第三节　麦克斯韦方程组 Maxwell equations

徐永丽

山西大同大学物理与电子科学学院

2013.9.5

教学目标(teaching objectives)

教学目标(teaching objectives)

1. 法拉第电磁感应定律;

教学目标(teaching objectives)

1. 法拉第电磁感应定律;
2. 麦克斯韦位移电流假设;

教学目标(teaching objectives)

1. 法拉第电磁感应定律;
2. 麦克斯韦位移电流假设;
3. 麦克斯韦电磁场理论;

教学目标(teaching objectives)

1. 法拉第电磁感应定律;
2. 麦克斯韦位移电流假设;
3. 麦克斯韦电磁场理论;
4. 洛仑兹力.

教学目标(teaching objectives)

1. 法拉第电磁感应定律;
2. 麦克斯韦位移电流假设;
3. 麦克斯韦电磁场理论;
4. 洛仑兹力.

1. 重点: 麦克斯韦方程组及其物理意义.
2. 难点: 位移电流假设.

1.法拉第电磁感应定律

静电场:

1.法拉第电磁感应定律

静电场:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \qquad \text{(Gauss定理)}$$

$$\nabla \times \vec{E} = 0$$

1.法拉第电磁感应定律

静电场:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \qquad \text{(Gauss定理)}$$

$$\nabla \times \vec{E} = 0$$

静磁场:

1.法拉第电磁感应定律

静电场:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \qquad \text{(Gauss定理)}$$

$$\nabla \times \vec{E} = 0$$

静磁场:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \qquad \text{(Ampere定律)}$$

1.法拉第电磁感应定律

静电场:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad \text{(Gauss定理)}$$

$$\nabla \times \vec{E} = 0$$

静磁场:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad \text{(Ampere定律)}$$

在静态情况下，电场与磁场相互独立.

1.法拉第电磁感应定律

静电场:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad \text{(Gauss定理)}$$

$$\nabla \times \vec{E} = 0$$

静磁场:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad \text{(Ampere定律)}$$

在静态情况下，电场与磁场相互独立.

实验发现:变化着的电场和磁场可以互相激发.

1.法拉第电磁感应定律

电场和磁场成为统一的整体——电磁场.

1.法拉第电磁感应定律

电场和磁场成为统一的整体——电磁场.

变化电磁场的新规律:

1. 变化磁场激发电场
   (Faraday电磁感应定律)
2. 变化电场激发磁场
   (Maxwell位移电流假设)

1.法拉第电磁感应定律

- 变化磁场激发电场:

(1831年Faraday电磁感应定律)

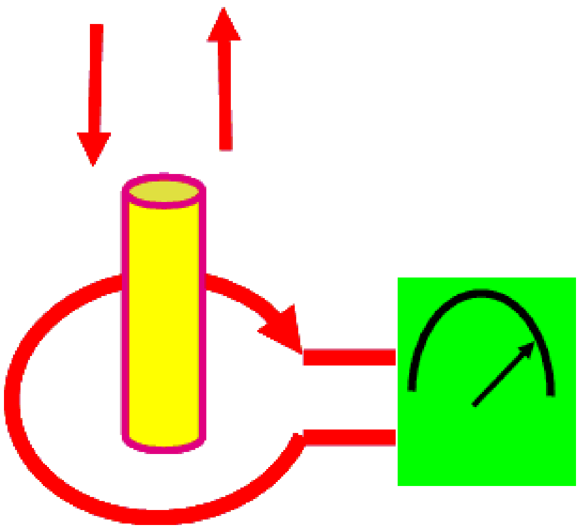
1.法拉第电磁感应定律

- 变化磁场激发电场:
  (1831年Faraday电磁感应定律)
  当磁场发生变化时，附近闭合线圈中有电流通过.

- 变化磁场激发电场:

(1831年Faraday电磁感应定律)

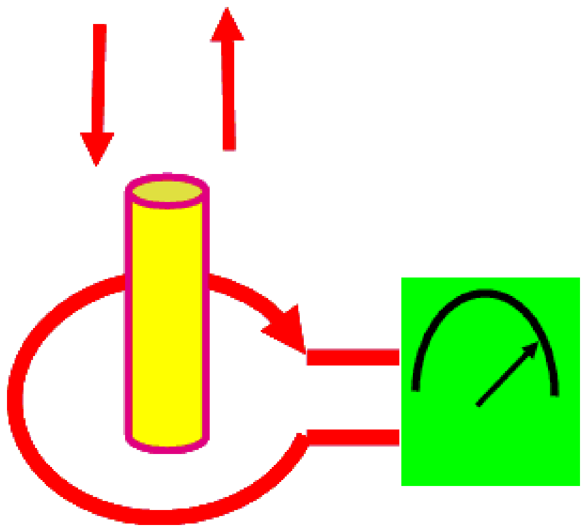
当磁场发生变化时，附近闭合线圈中有电流通过.



- 变化磁场激发电场:

(1831年Faraday电磁感应定律)

当磁场发生变化时，附近闭合线圈中有电流通过.



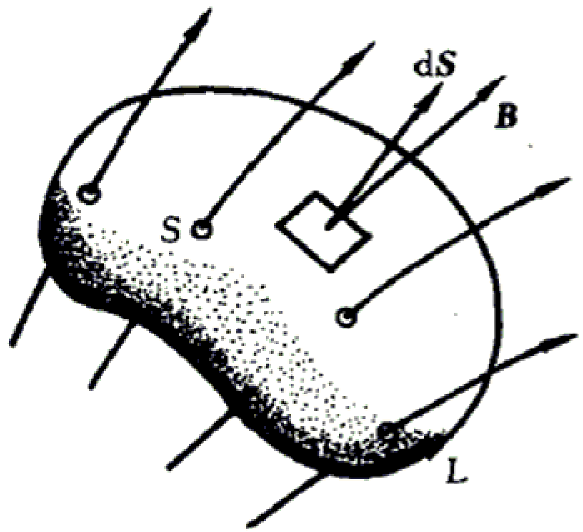
1.法拉第电磁感应定律

感应电动势的大小： $\varepsilon \propto \dfrac{d\Phi}{dt}$

1.法拉第电磁感应定律

感应电动势的大小：$\varepsilon \propto \frac{d\Phi}{dt}$

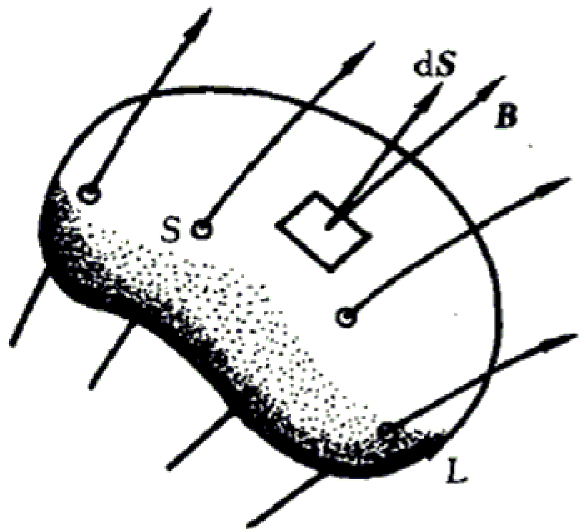
方向规定：L围绕方向与dS的法线方向成右手螺旋关系.



1.法拉第电磁感应定律

感应电动势的大小: $\varepsilon \propto \frac{d\Phi}{dt}$

方向规定: L围绕方向与$d\mathbf{S}$的法线方向成右手螺旋关系.



实验结果: 当Φ增加时, 线圈上的感应电动势与规定围绕方向相反.

1.法拉第电磁感应定律

在国际单位制中，电磁感应定律为：

1.法拉第电磁感应定律

在国际单位制中，电磁感应定律为：

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\cdot d\vec{S} \tag{1}$$

1.法拉第电磁感应定律

在国际单位制中，电磁感应定律为:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\cdot d\vec{S} \tag{1}$$

电磁感应现象的实质是:

1.法拉第电磁感应定律

在国际单位制中，电磁感应定律为:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\cdot d\vec{S} \tag{1}$$

电磁感应现象的实质是:
变化磁场在其周围空间中激发了电场，这是电场和磁场内部相互作用的一个方面.

1.法拉第电磁感应定律

- 电磁感应定律的微分形式:

1.法拉第电磁感应定律

- 电磁感应定律的微分形式:

$$\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\cdot d\vec{S}$$

1.法拉第电磁感应定律

- 电磁感应定律的微分形式:

$$\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\cdot d\vec{S}$$

$$\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot d\vec{S}$$

1.法拉第电磁感应定律

- 电磁感应定律的微分形式:

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

1.法拉第电磁感应定律

- 电磁感应定律的微分形式:

$$\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\cdot d\vec{S}$$

$$\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot d\vec{S}$$

由Stokes公式，其微分形式为:

1.法拉第电磁感应定律

- 电磁感应定律的微分形式:

$$\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\cdot d\vec{S}$$

$$\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot d\vec{S}$$

由Stokes公式，其微分形式为:

$$\nabla\times\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

- 电磁感应定律的微分形式:

$$\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\cdot d\vec{S}$$

$$\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot d\vec{S}$$

由Stokes公式，其微分形式为:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad (2)$$

由上式可以看出，感应电场是有旋场.

- 电磁感应定律的微分形式:

$$\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\cdot d\vec{S}$$

$$\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot d\vec{S}$$

由Stokes公式，其微分形式为:

$$\nabla\times\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{2}$$

由上式可以看出，感应电场是有旋场.
——这是磁场对电场作用的基本规律.

1.法拉第电磁感应定律

- 小结:

- 小结:

  (1)静止电荷所激发的静电场:有源、无旋性

$$\nabla \times \vec{E} = 0$$

1.法拉第电磁感应定律

- 小结:

(1)静止电荷所激发的静电场:有源、无旋性

$$\nabla \times \vec{E} = 0$$

(2)随时间变化的磁场激发感应电场:有旋场

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

- 小结:

(1)静止电荷所激发的静电场:有源、无旋性

$$\nabla\times\vec{E}=0$$

(2)随时间变化的磁场激发感应电场:有旋场

$$\nabla\times\vec{E}=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

(3)在一般情况下,电场由这两部分叠加而成.

2.麦克斯韦位移电流假设

- 变化电场激发磁场

2.麦克斯韦位移电流假设

- 变化电场激发磁场

问题1:

在稳定电流情况下，导出了电流激发磁场的规律——安培定律:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

- 变化电场激发磁场

问题1:

在稳定电流情况下，导出了电流激发磁场的规律——安培定律:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \qquad (3)$$

在一般的情况下是否成立?

2.麦克斯韦位移电流假设

假设：在一般的、非稳定情况下，此公式不做任何的修正，则：

2.麦克斯韦位移电流假设

假设：在一般的、非稳定情况下，此公式不做任何的修正，则：

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{B}) = \mu_0 \nabla \cdot \vec{J}$$

2.麦克斯韦位移电流假设

假设：在一般的、非稳定情况下，此公式不做任何的修正，则：

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{B}) = \mu_0 \nabla \cdot \vec{J}$$

根据：

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{B}) = 0$$

2.麦克斯韦位移电流假设

假设：在一般的、非稳定情况下，此公式不做任何的修正，则：

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{B}) = \mu_0 \nabla \cdot \vec{J}$$

根据：

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{B}) = 0$$

则在一般情况下，电流密度矢量须满足：

2.麦克斯韦位移电流假设

假设：在一般的、非稳定情况下，此公式不做任何的修正，则：

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{B}) = \mu_0 \nabla \cdot \vec{J}$$

根据：

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{B}) = 0$$

则在一般情况下，电流密度矢量须满足：

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0$$

2.麦克斯韦位移电流假设

前面指出：恒定电流是闭合的，故

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0$$

2.麦克斯韦位移电流假设

前面指出：恒定电流是闭合的，故

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0$$

在交变情况下，受到电荷守恒定律制约：

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

2.麦克斯韦位移电流假设

前面指出：恒定电流是闭合的，故

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0$$

在交变情况下，受到电荷守恒定律制约：

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \tag{4}$$

故在一般情况下，电流密度矢量

$$\nabla \cdot \vec{J} \neq 0$$

2.麦克斯韦位移电流假设

电荷守恒定律要求:

在稳定条件下得到的安培定律在推广到一般情况下必须修改

2.麦克斯韦位移电流假设

电荷守恒定律要求:
在稳定条件下得到的安培定律在推广到一般情况下必须修改

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

2.麦克斯韦位移电流假设

电荷守恒定律要求:

在稳定条件下得到的安培定律在推广到一般情况下必须修改

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

$$\Downarrow$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + ?$$

2.麦克斯韦位移电流假设

为了解决上述　盾，Maxwell提出一个假设:

2.麦克斯韦位移电流假设

为了解决上述 盾，Maxwell提出一个假设：在非稳恒情况下，产生磁场的原因不仅是传导电流J，应该还有新的来源，即存在一个称为位移电流的物理量J_D，它与电流J合起来构成总电流，满足：

2.麦克斯韦位移电流假设

为了解决上述 盾，Maxwell提出一个假设：在非稳恒情况下，产生磁场的原因不仅是传导电流J，应该还有新的来源，即存在一个称为位移电流的物理量J_D，它与电流J合起来构成总电流，满足：

$$\nabla \cdot (\vec{J} + \vec{J_D}) = 0$$

2.麦克斯韦位移电流假设

为了解决上述 盾，Maxwell提出一个假设：在非稳恒情况下，产生磁场的原因不仅是传导电流J，应该还有新的来源，即存在一个称为位移电流的物理量J_D，它与电流J合起来构成总电流，满足：

$$\nabla \cdot (\vec{J} + \vec{J_D}) = 0 \tag{5}$$

位移电流J_D与电流J一样产生磁效应

2.麦克斯韦位移电流假设

为了解决上述 盾，Maxwell提出一个假设：在非稳恒情况下，产生磁场的原因不仅是传导电流J，应该还有新的来源， 即存在一个称为位移电流的物理量J_D，它与电流J合起来构成总电流，满足：

$$\nabla \cdot (\vec{J} + \vec{J_D}) = 0 \tag{5}$$

位移电流J_D与电流J一样产生磁效应

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0(\vec{J} + \vec{J_D}) \tag{6}$$

2.麦克斯韦位移电流假设

$$\left.\begin{array}{l}\nabla\cdot\vec{J}+\dfrac{\partial\rho}{\partial t}=0\\ \nabla\cdot\vec{E}=\dfrac{\rho}{\varepsilon_0}\end{array}\right\}$$

2.麦克斯韦位移电流假设

$$\left.\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

可得:

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t}\varepsilon_0(\nabla \cdot \vec{E}) = 0$$

2.麦克斯韦位移电流假设

$$\left.\begin{array}{l}\nabla\cdot\vec{J}+\frac{\partial\rho}{\partial t}=0\\ \nabla\cdot\vec{E}=\frac{\rho}{\varepsilon_0}\end{array}\right\}\tag{7}$$

可得:

$$\nabla\cdot\vec{J}+\frac{\partial}{\partial t}\varepsilon_0(\nabla\cdot\vec{E})=0\tag{8}$$

$$\Downarrow$$

$$\nabla\cdot(\vec{J}+\varepsilon_0\frac{\partial}{\partial t}\vec{E})=0\tag{9}$$

2.麦克斯韦位移电流假设

和(5)式相比，可得:

$$\vec{J} \to \vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E}$$

和(5)式相比，可得:

$$\vec{J} \to \vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E}$$

又:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

2.麦克斯韦位移电流假设

和(5)式相比，可得:

$$\vec{J} \to \vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E}$$

又:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

即:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 (\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E})$$

2.麦克斯韦位移电流假设

和(5)式相比，可得:

$$\vec{J} \to \vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E}$$

又:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

即:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 (\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E})$$

就能够满足在任何情况下:

和(5)式相比，可得:

$$\vec{J} \to \vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}\vec{E}$$

又:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

即:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0(\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}\vec{E})$$

就能够满足在任何情况下:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{B}) = 0$$

2.麦克斯韦位移电流假设

比较可得:

2.麦克斯韦位移电流假设

比较可得:

$$\vec{J}_D = \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}\vec{E} \tag{10}$$

比较可得:

$$\vec{J}_D = \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} \tag{10}$$

1. 位移电流的引入是麦克斯韦对电磁场理论作出的最杰出的贡献;

2.麦克斯韦位移电流假设

比较可得:

$$\vec{J}_D = \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}\vec{E} \tag{10}$$

1. 位移电流的引入是麦克斯韦对电磁场理论作出的最杰出的贡献;
2. 位移电流的引入从另一个侧面揭示了电场和磁场之间的联系,不仅随时间变化的磁场激发电场，随时间变化的电场同样能激发磁场.

问题2:

非稳恒情况下磁场的散度:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{11}$$

与法拉第定律是否存在矛盾?

问题2:

非稳恒情况下磁场的散度:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{11}$$

与法拉第定律是否存在矛盾?

对法拉第定律两边取散度得到:

2.麦克斯韦位移电流假设

问题2:

非稳恒情况下磁场的散度:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{11}$$

与法拉第定律是否存在矛盾?

对法拉第定律两边取散度得到:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{E}) = -\nabla \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \vec{B})$$

2.麦克斯韦位移电流假设

根据:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{E}) = 0$$

2.麦克斯韦位移电流假设

根据:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{E}) = 0$$

则要求:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \vec{B}) = 0$$

2.麦克斯韦位移电流假设

根据:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{E}) = 0$$

则要求:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \vec{B}) = 0$$

即:

$$\nabla \cdot \vec{B} = C$$

2.麦克斯韦位移电流假设

根据:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{E}) = 0$$

则要求:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \vec{B}) = 0$$

即:

$$\nabla \cdot \vec{B} = C$$

稳定电流情况下，所激发的磁场满足:

2.麦克斯韦位移电流假设

根据:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{E}) = 0$$

则要求:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \vec{B}) = 0$$

即:

$$\nabla \cdot \vec{B} = C$$

稳定电流情况下，所激发的磁场满足:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

2.麦克斯韦位移电流假设

根据:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{E}) = 0$$

则要求:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \vec{B}) = 0$$

即:

$$\nabla \cdot \vec{B} = C$$

稳定电流情况下，所激发的磁场满足:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

与法拉第定律并无矛盾.

- Maxwell方程组微分形式:

- Maxwell方程组微分形式:

$$
\begin{aligned}
\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\
\nabla \times \vec{B} &= \mu_0(\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}\vec{E}) \\
\nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon_0} \\
\nabla \cdot \vec{B} &= 0
\end{aligned}
\tag{12}
$$

- Maxwell方程组微分形式:

$$
\begin{aligned}
\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\
\nabla \times \vec{B} &= \mu_0(\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}\vec{E}) \\
\nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon_0} \\
\nabla \cdot \vec{B} &= 0
\end{aligned}
\tag{12}
$$

反映电荷、电流激发电磁场以及电磁场内部的运动规律.

麦克斯韦电磁场理论物理意义在于:

麦克斯韦电磁场理论物理意义在于:

1. 电荷和电流可以激发电、磁场，随时间变化的电场和磁场也可以相互激发;

3.麦克斯韦电磁场理论

麦克斯韦电磁场理论物理意义在于:

1. 电荷和电流可以激发电、磁场，随时间变化的电场和磁场也可以相互激发;
2. 在ρ和J为零的区域，电场和磁场通过相互激发而运动传播;

3.麦克斯韦电磁场理论

麦克斯韦电磁场理论物理意义在于:

1. 电荷和电流可以激发电、磁场，随时间变化的电场和磁场也可以相互激发;
2. 在ρ和J为零的区域，电场和磁场通过相互激发而运动传播;
3. 从理论上预言了电磁波的存在，同时指出光是一种电磁波，1888年Hertz的电磁波的实验验证其正确性.

- Maxwell方程组积分形式:

- Maxwell方程组积分形式:

$$\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\cdot d\vec{S}$$
$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \frac{1}{c^2}\frac{d}{dt}\int_S \vec{E}\cdot d\vec{S}$$
$$\oint_S \vec{E}\cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$
$$\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S} = 0 \qquad (13)$$

- Maxwell方程组积分形式:

$$
\begin{aligned}
\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l} &= -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\cdot d\vec{S} \\
\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} &= \mu_0 I + \frac{1}{c^2}\frac{d}{dt}\int_S \vec{E}\cdot d\vec{S} \\
\oint_S \vec{E}\cdot d\vec{S} &= \frac{Q}{\varepsilon_0} \\
\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S} &= 0
\end{aligned}
\qquad (13)
$$

其中$c=\frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}$为电磁波在真空中的传播速度——光速.

4.洛伦兹力

1. 如果电荷为连续分布，带电体系受到的静电场力:

$$d\vec{F} = \rho\vec{E}dV$$

4.洛伦兹力

1. 如果电荷为连续分布，带电体系受到的静电场力:

$$d\vec{F} = \rho\vec{E}dV$$

2. 恒定电流元JdV受到的磁场作用力:

$$d\vec{F} = \vec{J}dV \times \vec{B}$$

1. 如果电荷为连续分布，带电体系受到的静电场力:

$$d\vec{F} = \rho \vec{E} dV$$

2. 恒定电流元JdV受到的磁场作用力:

$$d\vec{F} = \vec{J} dV \times \vec{B}$$

3. 电荷系统单位体积受到的力密度:

$$\vec{f} = \rho \vec{E} + \vec{J} \times \vec{B}$$

洛伦兹把这个结果推广为在普遍的情况下电磁场对电荷系统的作用力.

洛伦兹把这个结果推广为在普遍的情况下电磁场对电荷系统的作用力.

单个的带电粒子受到的洛伦兹力:

$$\vec{F} = e\vec{E} + e\vec{v} \times \vec{B}$$

4.洛伦兹力

洛伦兹把这个结果推广为在普遍的情况下电磁场对电荷系统的作用力.

单个的带电粒子受到的洛伦兹力:

$$\vec{F} = e\vec{E} + e\vec{v} \times \vec{B}$$

(适用于任意运动速度的带电粒子)

小结:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} = \mu_0(\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}\vec{E}) \\ \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \\ \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \frac{1}{c^2}\frac{d}{dt}\int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \\ \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\varepsilon_0} \\ \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \end{cases}$$

小结:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} = \mu_0(\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}\vec{E}) \\ \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \\ \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \frac{1}{c^2}\frac{d}{dt}\int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \\ \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\varepsilon_0} \\ \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \end{cases}$$

Maxwell方程组和洛伦兹力公式构成了经典电动力学的理论基础.