10.7 位移电流

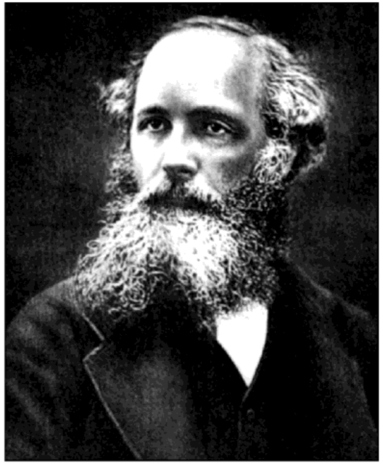
Displacement Current

电磁场基本方程的积分形式

Basic Equations of Electromagnetic Field

1865 年麦克斯韦在总结前人工作的基础上，提出完整的电磁场理论，主要贡献是提出了“感生电场”和“位移电流”两个假设，从而预言电磁波的存在，并计算出真空中电磁波的速度（即光速）为：

$$\boxed{c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}}$$



麦克斯韦

James Clerk Maxwell

1831--1879

1888 年赫兹的实验证实了他的预言，麦克斯韦理论奠定了经典电磁学的基础，为无线电技术和现代电子通讯技术发展开辟了广阔前景。

1999年，英国广播公司（BBC）所评选出的1000年来最伟大的10位思想家中麦克斯韦与马克思、爱因斯坦、牛顿等人一起榜上有名，他排名第九。后由英国杂志《物理世界》在100位著名物理学家中选出的10位最伟大者中，麦克斯韦紧跟爱因斯坦和牛顿排名第三。

一、位移电流 Displacement Current

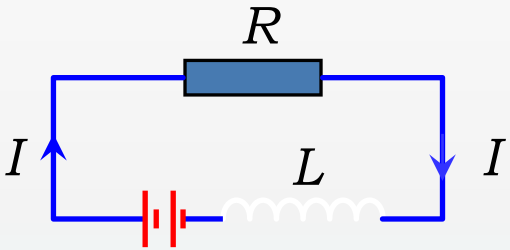
随时间变化的磁场 ——→ 感生电场(涡旋电场)

随时间变化的电场 ——→ 磁场？

1、电流的连续性问题

对稳恒电路：

包含电阻、电感线圈的电路，电流是连续的。



稳恒磁场的安培环路定理：

$$\oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum_{(L内)} I_0$$ ——→ 穿过以L为边界的任意曲面的传导电流

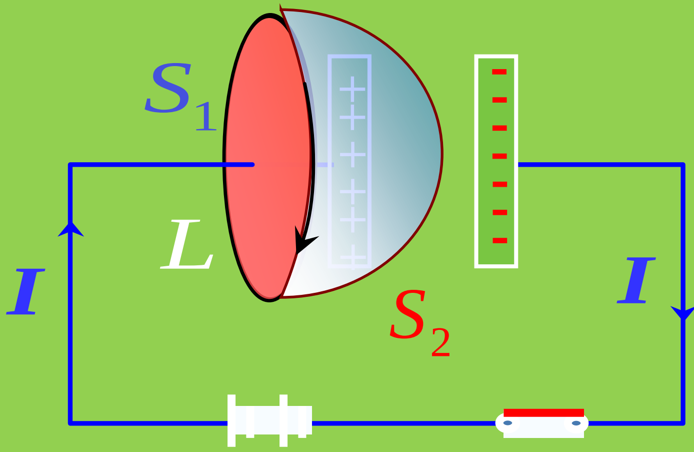
问题：在电流非稳恒状态下安培环路定理是否正确？

一、位移电流 Displacement Current

1、电流的连续性问题

对非稳恒电路:

电容器充电过程为例



在电流非稳恒状态下，

安培环路定理是否正确？

对 S_1面: $\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = I$

矛盾

对 S_2 面: $\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = 0$

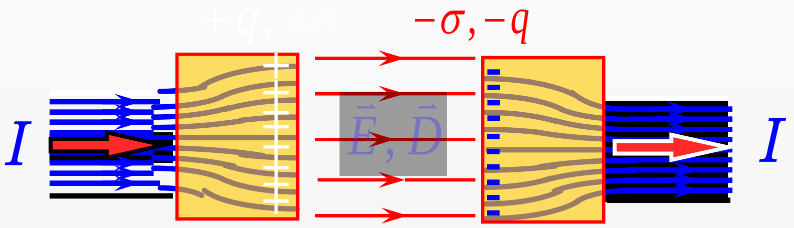
任意时刻空间每一点的磁场都是确定的,

对于确定的回路积分只应有唯一确定的值。

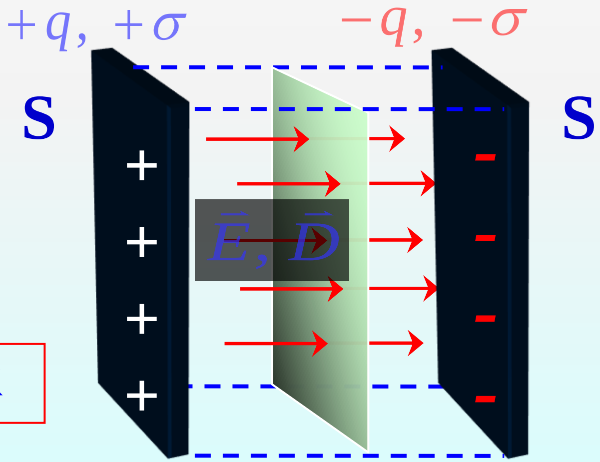
说明将安培环路定理推广到一般情况时需要进行补充和修正。

一、位移电流 Displacement Current

2、位移电流 出现矛盾的原因：非稳恒情况下传导电流不连续



电容器上极板在充放电过程中，
极板上电荷积累随时间变化。



$$E=\frac{\sigma}{\varepsilon_0},\qquad D=\varepsilon_0 E=\sigma$$

$$I=\frac{dq}{dt}=\frac{d(DS)}{dt}=S\frac{dD}{dt}$$

传导电流 ⟶ $I=\dfrac{d\Psi_D}{dt}$ ⟶ 电位移通量的时间变化率

↓

看作为一种电流

一、位移电流 Displacement Current

2、位移电流

1861年，麦克斯韦又提出另一个重要假设：
变化的电场象传导电流一样能产生磁场，从产生磁场的角度看，
变化的电场可以等效为一种电流，

麦克斯韦把这种电流称为位移电流(displacement current)。

定义：通过电场中某一截面的位移电流
等于通过该截面的电位移通量随时间的变化率，即：

$$I_D = \frac{d\Psi_D}{dt} = \frac{d}{dt}\int_S \vec{D}\cdot d\vec{S}$$

电场中某一点位移电流密度
等于该点电位移矢量对时间的变化率，即：

$$j_D = \frac{dD}{dt},$$

一、位移电流 Displacement Current

3、传导电流与位移电流的比较

1）位移电流在产生磁场方面与传导电流等效

2）传导电流：自由电荷宏观定向运动形成；
位移电流：变化电场产生

3）传导电流产生焦耳热，在导体中存在；
位移电流不产生焦耳热，在导体、电介质、真空中均可存在。

4、 全电流

全电流=传导电流+位移电流

$$\boxed{I_{全} = I_{传导} + I_{位移}}$$

对任何电路，全电流总是连续的

一、位移电流 Displacement Current

5、全电流安培环路定律（推广的安培环路定理）

$$\boxed{\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = \sum I_{传导电流} + \sum I_D}$$

6、位移电流的计算

步骤： 1）选择曲面的正法线方向；

2）计算通过该曲面的电位移矢量的通量：$\Psi_D = \int_S \vec{D}\cdot d\vec{S}$

3）计算通过该曲面的位移电流：$I_D = \dfrac{d\Psi_D}{dt}$

$I_D > 0$ 位移电流方向与曲面的正法线方向一致

$I_D < 0$ 位移电流方向与曲面的正法线方向相反

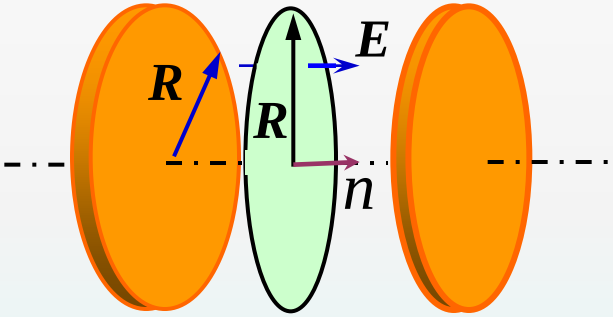
例10-13： 半径为 R 的两块圆板，构成平板电容器。

现均匀充电，使电容器两极板间的电场变化率：$\dfrac{dE}{dt} = 恒量 > 0$ ，

求：1) 极板间的位移电流；

2) 距轴线 R 处的磁感应强度。

解： 1) 在两极板间取一半径为 R 的圆面，正法线方向如图所示，



$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}$

通过该圆面的电位移矢量的通量为：

$$\Psi_D = \vec{D} \cdot \vec{S} = DS = \pi R^2 \cdot \varepsilon_0 E$$

通过该圆面的位移电流为：

$$I_D = \frac{d\Psi_D}{dt} = \pi \varepsilon_0 R^2 \frac{dE}{dt}$$

$I_D > 0$

位移电流方向与正法线方向一致

例10-13： 半径为 R 的两块圆板，构成平板电容器。

现均匀充电，使电容器两极板间的电场变化率：$\dfrac{dE}{dt}=\text{恒量}>0$ ，

求：1) 极板间的位移电流；

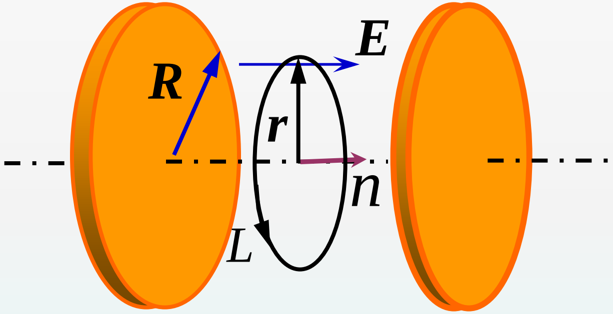
2) 距轴线 R 处的磁感应强度。

解：2) 磁场分布应具有轴对称性，

如图在两极板间取一半径为r的回路，

回路绕行方向如图所示，

圆面的正法线方向如图所示，



$\vec{D}=\varepsilon_0\vec{E}$

通过半径为r的圆面的电位移矢量的通量为：

$$\Psi_D=\vec{D}\cdot\vec{S}=DS=\pi r^2\cdot\varepsilon_0 E$$

通过该圆面的位移电流为：

$$I_D=\frac{d\Psi_D}{dt}=\pi\varepsilon_0 r^2\frac{dE}{dt}$$

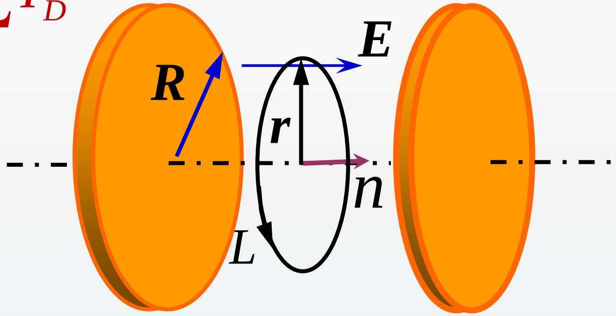
例10-13: 半径为 R 的两块圆板，构成平板电容器。

现均匀充电，使电容器两极板间的电场变化率：$\dfrac{dE}{dt}=$ 恒量 >0 ，

求：1) 极板间的位移电流；

2) 距轴线 R 处的磁感应强度。

解：2) 由全电流定律：$\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l}=\sum I_{传导}+\sum I_D=\sum I_D$



$$H\cdot 2\pi r=\pi\varepsilon_0 r^2\frac{dE}{dt}$$

距轴线 r 处的磁场强度和磁感应强度为：

$$H=\frac{\varepsilon_0 r}{2}\cdot\frac{dE}{dt},\qquad H=\frac{B}{\mu_0},\qquad B_r=\frac{\mu_0\varepsilon_0 r}{2}\cdot\frac{dE}{dt}$$

$r=R$处，$\qquad B_R=\dfrac{\mu_0\varepsilon_0 R}{2}\cdot\dfrac{dE}{dt}$

通过该圆面的位移电流为：

$$I_D=\pi\varepsilon_0 r^2\frac{dE}{dt}$$

二、麦克斯韦方程组的积分形式 *Maxwell Equations*

1、电场 Electric Field

一般电场：$\begin{cases} \text{静止电荷激发的电场} \rightarrow \text{静电场} \\ \text{变化的磁场激发的电场} \rightarrow \text{感生电场（涡旋电场）} \end{cases}$

A、环路定理

静电场：$$\oint_L \vec{E}_{静} \cdot d\vec{l} = 0$$

涡旋电场：$$\oint_L \vec{E}_{感生} \cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

一般电场：$$\vec{E} = \vec{E}_{静} + \vec{E}_{感生}$$

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

二、麦克斯韦方程组的积分形式 *Maxwell Equations*

1、电场 *Electric Field*

一般电场：$\begin{cases} \text{静止电荷激发的电场} \rightarrow \text{静电场} \\ \text{变化的磁场激发的电场} \rightarrow \text{感生电场（涡旋电场）} \end{cases}$

B、高斯定理

静电场：$\oint_S \vec{D}_{静} \cdot d\vec{S} = \sum q_{自由电荷}$

涡旋电场：$\oint_S \vec{D}_{感生} \cdot d\vec{S} = 0$

一般电场：$\vec{D} = \vec{D}_{静} + \vec{D}_{感生}$

$$\boxed{\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum q_{自由电荷}}$$

二、麦克斯韦方程组的积分形式 *Maxwell Equations*

1、电场 Electric Field

一般电场：
- 静止电荷激发的电场 →静电场
- 变化的磁场激发的电场→感生电场（涡旋电场）

一般电场：
$$\vec{E}=\vec{E}_{静}+\vec{E}_{感生} \qquad \vec{D}=\vec{D}_{静}+\vec{D}_{感生}$$

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

高斯定理
$$\boxed{\oint_S \vec{D}\cdot d\vec{S}=\sum q_{自由电荷}}$$

二、麦克斯韦方程组的积分形式 *Maxwell Equations*

2、磁场 *Magnetic Field*

A、环路定理

（全电流定律）

$$\boxed{\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = \sum I_{传导电流} + \sum I_D}$$

B、高斯定理

$$\boxed{\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S} = 0}$$

二、麦克斯韦方程组的积分形式 *Maxwell Equations*

3、麦克斯韦方程组的积分形式

电场

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

$$\oint_S D\cdot d\vec{S} = \sum q_{自由电荷}$$

磁场

$$\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = \sum I_{传导电流} + \sum I_D$$

$$\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S} = 0$$

二、麦克斯韦方程组的积分形式 *Maxwell Equations*

4、麦克斯韦方程组的意义

麦克斯韦的电磁理论具有以下几个特点：

（1）物理概念创新（涡旋电场、位移电流）

（2）逻辑体系严密

（3）数学形式简单优美

（4）演绎方法出色

（5）电场与磁场以及时间和空间的明显对称性

麦克斯韦的电磁理论对电磁场宏观实验规律的全面总结和概括，是经典物理学最引以自豪的成就之一，它揭示出了电磁相互作用的完美统一，并且预言了电磁波的存在。

小 结：

1、位移电流：

$$I_D = \frac{d\Psi_D}{dt} = \frac{d}{dt}\int_S \vec{D}\cdot d\vec{S}$$

2、全电流定律：

$$\boxed{\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = \sum I_{传导电流} + \sum I_D}$$

3、麦克斯韦方程组的积分形式 ：

$$\boxed{\begin{cases} \oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\int_S \dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot d\vec{S} \\ \oint_S D\cdot d\vec{S} = \sum q_{自由电荷} \\ \oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = \sum I_{传导电流} + \sum I_D \\ \oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S} = 0 \end{cases}}$$