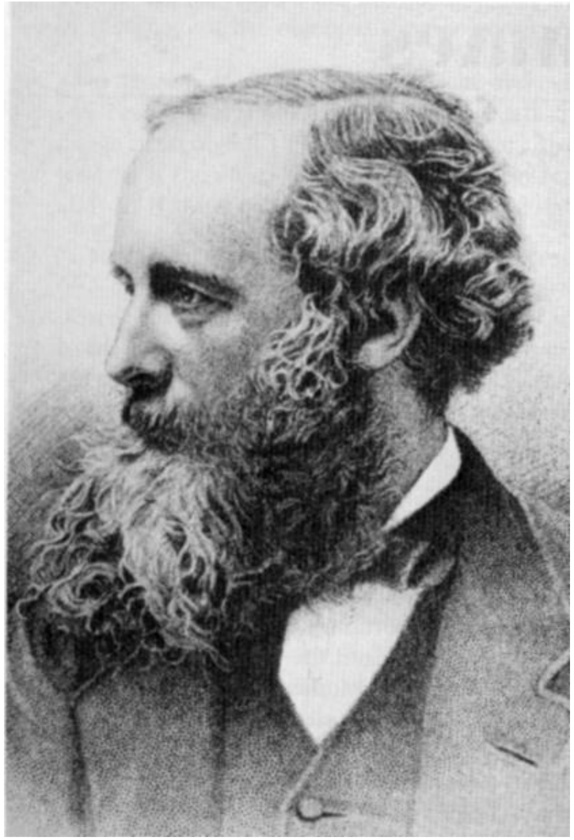
第八章 麦克斯韦方程组

8.1位移电流

8.2麦克斯韦方程组

主要内容

8.1 位移电流

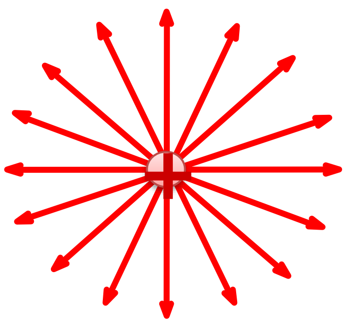


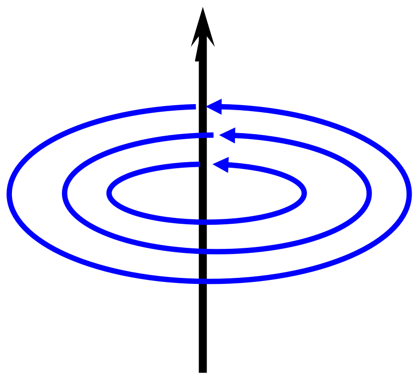
经典电磁理论奠基人，气体动理论创始人之一，提出了气体分子按速率分布的统计规律。建立了经典电磁理论，提出了有旋场和位移电流的概念，并预言了以光速传播的电磁波的存在。

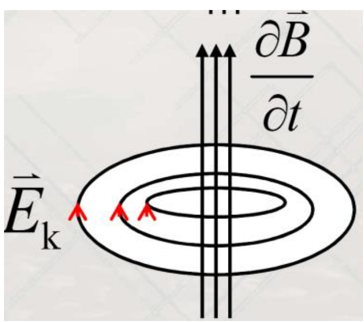
麦克斯韦（1831－1879）
英国物理学家

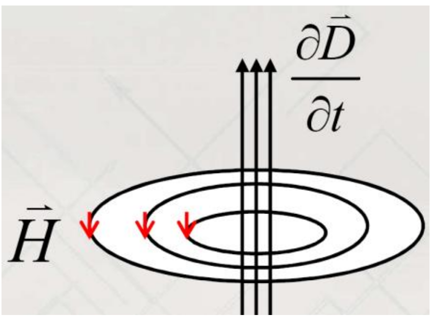
8.1 位移电流

静电荷可产生无旋静电场；稳恒电流可产生涡旋静磁场。
变化的磁场产生涡旋电场。**变化的电场**能否产生磁场？



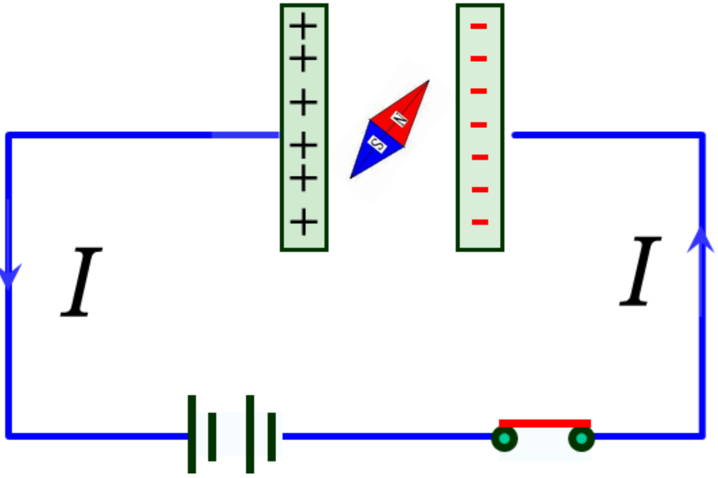






法拉第： 充放电时，板间出现磁场。

但板间并**没有传导电流**！



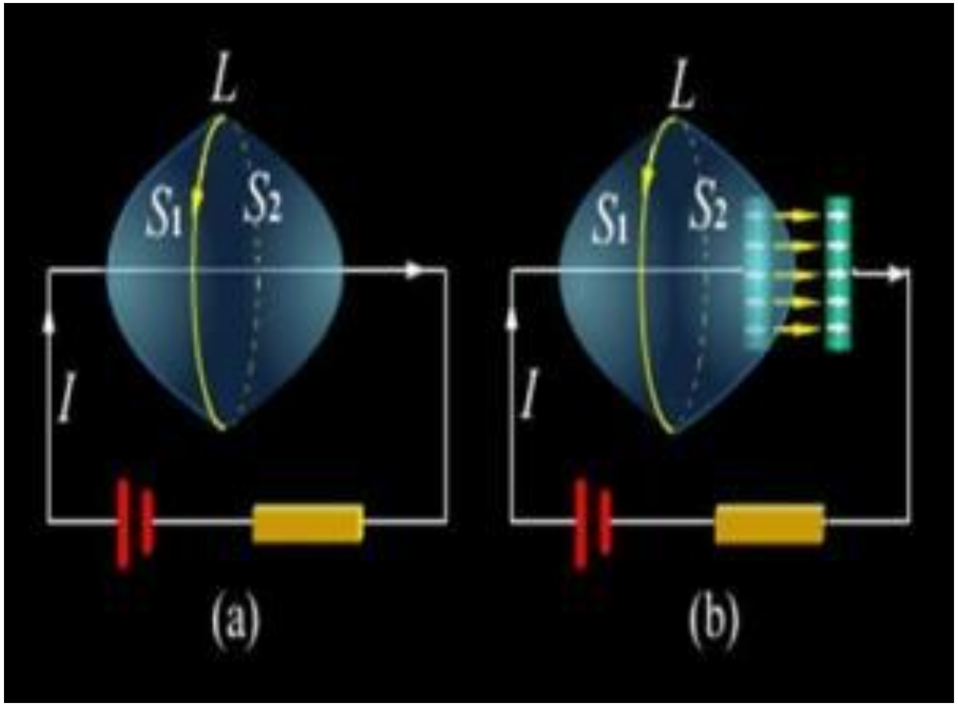
麦克斯韦：

假设存在**虚拟电流，** 表示变化电场等效传导电流的磁效应

8.1 位移电流

稳恒电流：
流入闭合曲面的电流
等于流出闭合曲面的电流。
（电荷定向移动）

交变电流：
电流只流入闭合曲面；
或电流只流出闭合曲面。
（极板电荷的增减）



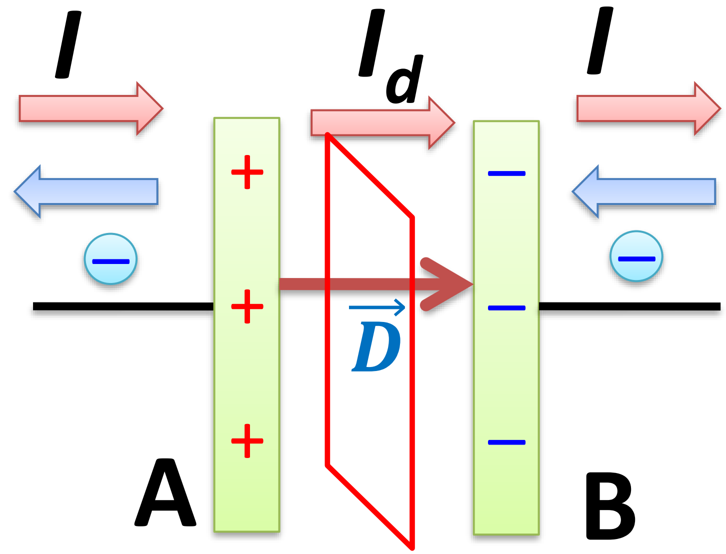
磁场对于闭合曲线的积分：

$$\oint_L \vec{H} \cdot \mathrm{d}\vec{r} = I$$

黄色曲线L,为闭合曲线：
面积的选取：
S_1 有电流穿过，积分不为零；
S_2无电流穿过，积分为零。

8.1 位移电流

充放电时，板上电荷发生变化，板间的电流不存在，但电场随时间变化，产生磁场。



电极板上电荷：　$Q = \boldsymbol{\sigma S}$

$$D = \sigma$$

Φ_e:电位移通量

$$\frac{\mathrm{d}\Phi_e}{\mathrm{d}t} = \frac{d}{\mathrm{d}t}\vec{D}\cdot\mathrm{d}\vec{S} = \frac{\partial}{\partial t}(\boldsymbol{\sigma}\mathrm{dS}) = J_d dS$$

位移电流密度：

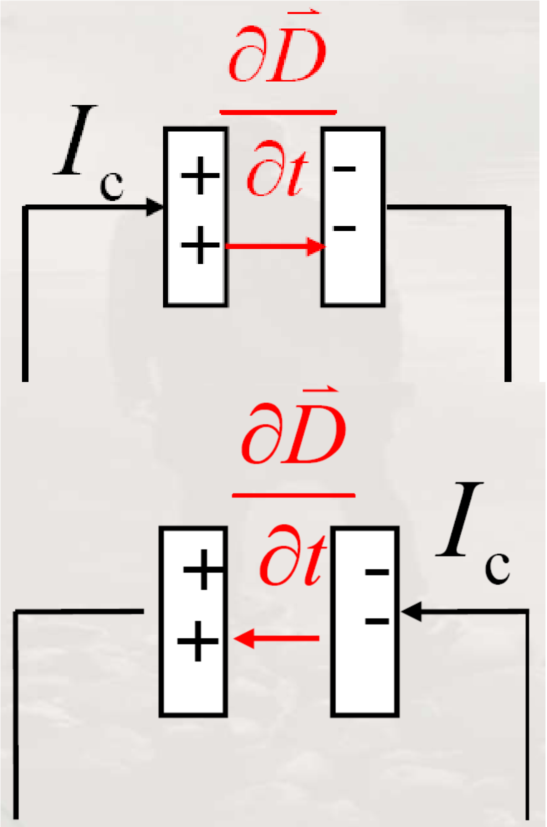
$$\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

位移电流是变化电场等效的电流，体现磁效应，不产生热效应。（都是电荷变化）

8.1 位移电流

$\vec{D}$ 的方向：假设从左到右

$\dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t}$的方向：与充、放电过程有关



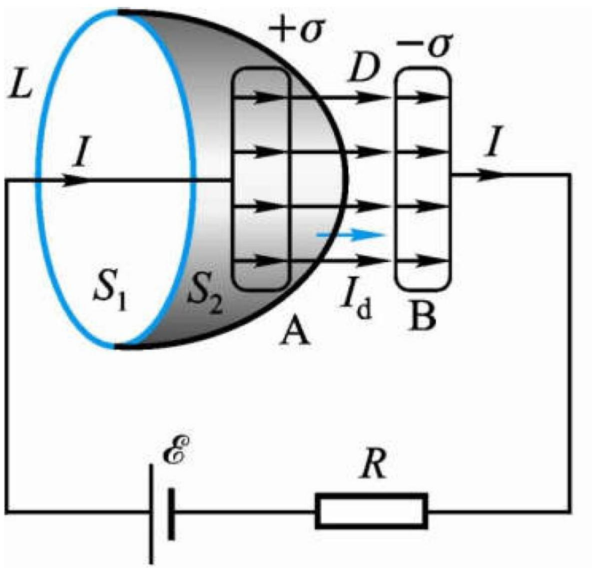
充电时： $\vec{J}_d = \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t} > 0$ 与$\vec{D}$ 同向

放电时： $\vec{J}_d = \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t} < 0$ 与$\vec{D}$ 反向

位移电流的方向： 与导线中电流方向一致。

8.1 位移电流

安培环路定理：



$$\oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{r} = I$$

传导电流 **位移电流**

$$I_c = \int_S \vec{J}\cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

$$I_d = \int_S \frac{\partial}{\partial t}\vec{D}\cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

均可以激发
涡旋磁场

全电流安培环路定理：

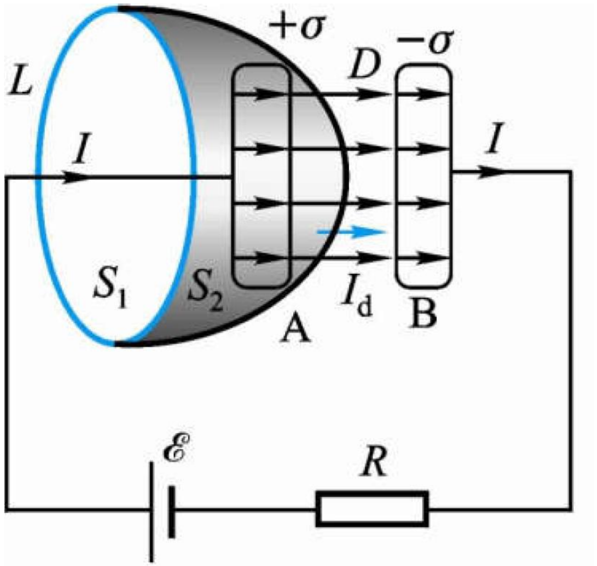
$$\oint_L \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{r} = \int_S \left(\vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right)\cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

8.1 位移电流

全电流: $I = I_c + I_d$

导线中，S_1面: $I = I_c = \dfrac{dq}{dt}$

电容器，S_2面 $I = I_d = \displaystyle\int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$



全电流在空间中是连续的:
导线里是传导电流，电容器中是位移电流。

$$\oint_L \vec{H} \cdot \mathrm{d}\vec{r} = \int_S \left(\vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

通过闭合回路为边线的任意曲面，全电流是一样的。

8.2 麦克斯韦方程组

$$
\begin{cases}
\oiint_S \vec{D} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = \iiint_V \rho_e \mathrm{d}V \\
\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \\
\oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \\
\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{r} = \iint_S \left(\vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}
\end{cases}
$$

无旋的电场：
静止的电荷产生
（电场的高斯定理）

涡旋的电场：
变化的磁场产生
（法拉第电磁感应定律）

无旋的磁场：
不存在的磁单极，不存在
（磁场的高斯定理）

涡旋的磁场：
稳恒电流和变化的电场。
（安培环路定理）

8.2 麦克斯韦方程组

$$
\begin{cases}
\vec{\nabla}\cdot\vec{D}=\rho_e, \\
\vec{\nabla}\times\vec{E}=-\dfrac{\partial\vec{B}}{\partial t}, \\
\vec{\nabla}\cdot\vec{B}=0, \\
\vec{\nabla}\times\vec{H}=\vec{J}_c+\dfrac{\partial\vec{D}}{\partial t}
\end{cases}
$$

电场的散度：静止的电荷产生

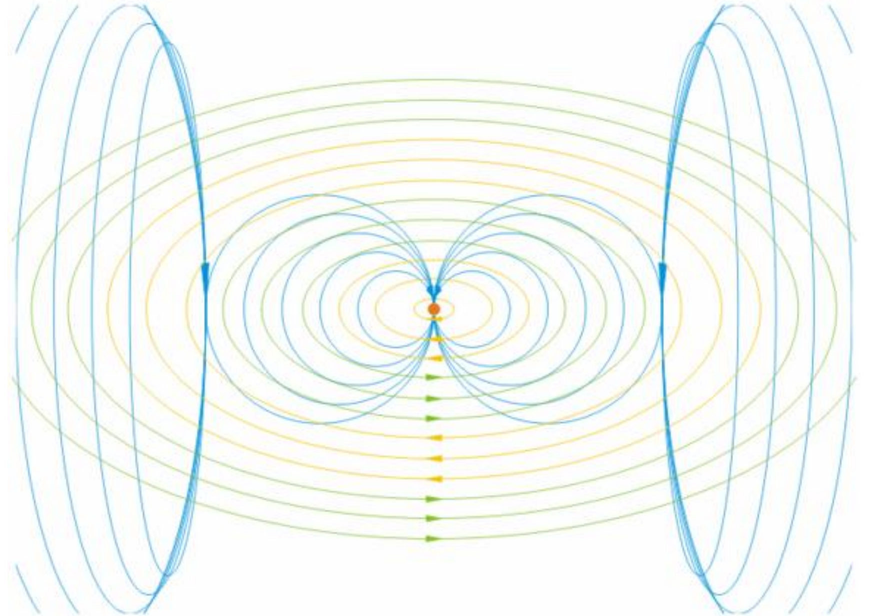
电场的旋度：变化的磁场产生

磁场的散度：不存在的磁单极，为零

磁场的旋度：稳恒电流和变化的电场。

麦克斯韦1865年提出的最初形式由20个等式和20个变量组成。现有形式以矢量分析形式重新表达。

电磁波的传播：



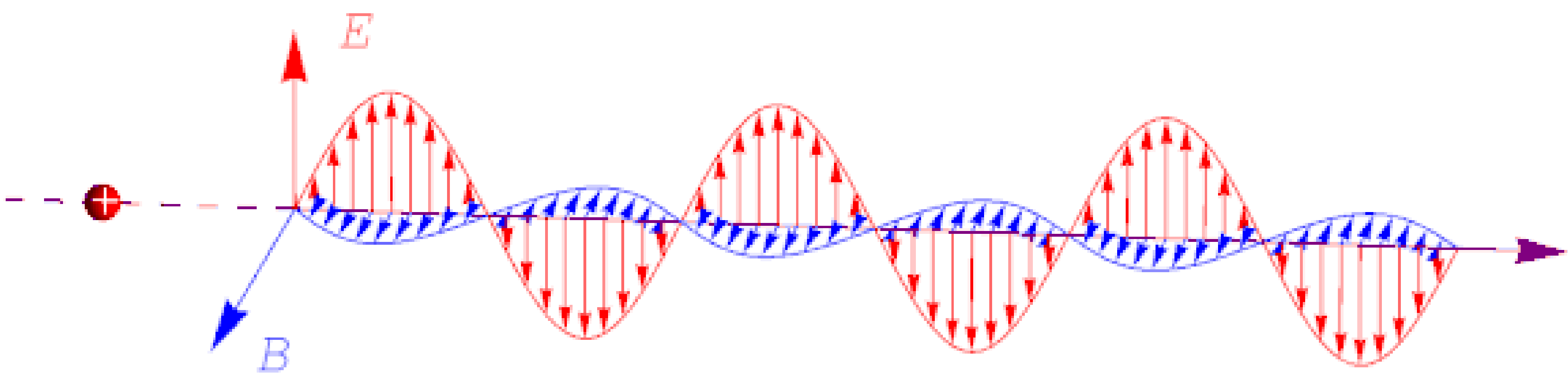
静止的正负电荷对，产生电场。

若有相对运动：

变化的电场产生变化的磁场，

变化的磁场产生变化的电场。

循环往复，环环相扣，生生不息。



麦克斯韦方程组作业

默写麦克斯韦方程组的积分形式