CHƯƠNG XIII:TRƯỜNG ĐIỆN TỪ

Tô Thị Thảo

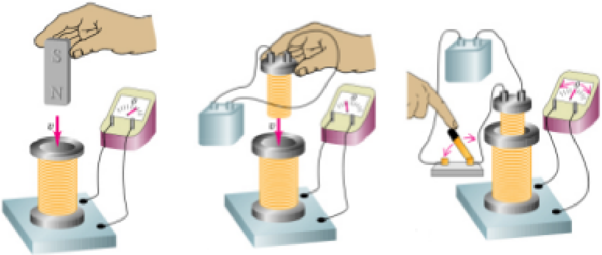
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Ngày 29 tháng 5 năm 2023

Nội dung

Thí nghiệm Faraday về hiện tượng cảm ứng điện từ

Michael Faraday
(1791-1867)

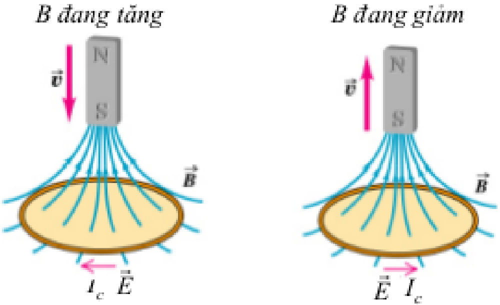


Biến thiên từ thông (sinh ra bởi nam châm hoặc cuộn dây có dòng điện)

- Suất điện động cảm ứng: $\xi_c = -\dfrac{d\Phi_m}{dt}$
- Dòng cảm ứng: I_c

Điện trường xoáy và luận điểm thứ nhất của Maxwell

Jame Clerk Maxwell
(1831 - 1879)



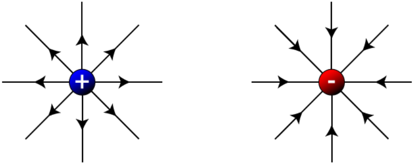
Tồn tại một điện trường $\vec{E}$ cùng chiều dòng cảm ứng I_c

- Không phụ thuộc bản chất dây dẫn
- Không phụ thuộc nhiệt độ

Điện trường xoáy và luận điểm thứ nhất của Maxwell

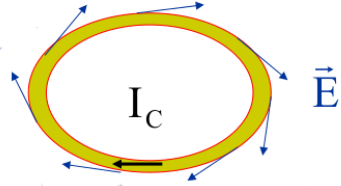
Điện trường tĩnh

$$\begin{cases} \text{–Điện tích đứng yên} \\ \text{–Đường sức không khép kín} \\ \text{–Công thực hiện di chuyển điện tích} \\ \quad \text{theo đường cong kín} = 0 : \oint \vec{E} d\vec{\ell} = 0 \end{cases}$$



Điện trường xoáy

$$\begin{cases} \text{–Điện tích di chuyển} \\ \text{–Đường sức khép kín} \\ \text{–Công thực hiện di chuyển điện tích} \\ \quad \text{theo đường cong kín} \neq 0 : \oint \vec{E} d\vec{\ell} \neq 0 \end{cases}$$



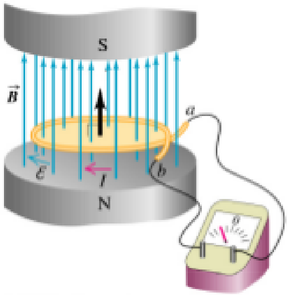
Điện trường xoáy và luận điểm thứ nhất của Maxwell

Điện trường $\vec{E}$ của dòng cảm ứng I_c (sinh ra bởi từ trường) có đường sức khép kín $\Rightarrow$ điện trường xoáy.

Luận điểm thứ nhất của Maxwell:

Bất kỳ một từ trường nào biến đổi theo thời gian cũng sinh ra một điện trường xoáy!

3. Phương trình Maxwell - Faraday



Vòng dây dẫn kín đặt trong B biến đổi

- Biến thiên từ thông $d\Phi_m$ gửi qua vòng dây trong thời gian $dt \Rightarrow$ xuất hiện suất điện động ξ_c

$$\xi_c = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{d}{dt}\left(\int_S \vec{B}d\vec{S}\right)$$

- Theo định nghĩa về suất điện động: $\xi_c = \oint_C \vec{E}d\vec{\ell}$

$$\oint_C \vec{E}d\vec{\ell} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}d\vec{S}$$

Lưu số của vector cường độ điện trường xoáy dọc theo một đường cong kín bất kỳ bằng nhưng trái dấu với tốc độ biến thiên theo thời gian của từ thông gửi qua diện tích giới hạn bởi đường cong kín đó.

Dạng vi phân của phương trình Maxwell-Faraday

Dạng tích phân của Maxwell-Faraday: $\boxed{\oint_C \vec{E} d\vec{\ell} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B} d\vec{S}}$

- Vế trái theo định lý Stokes: $\oint_C \vec{E} d\vec{\ell} = \int_S (\nabla \times \vec{E}).d\vec{S} = \int_S rot\vec{E}.d\vec{S}$
- Vế phải có thể viết được: $-\frac{d}{dt}\left(\int_S \vec{B} d\vec{S}\right) = \int_S \left(-\frac{d\vec{B}}{dt}\right) d\vec{S}$

$$\int_S rot\vec{E}.d\vec{S} = \int_S \left(-\frac{d\vec{B}}{dt}\right) d\vec{S}$$

Dạng vi phân của Maxwell-Faraday:

$$\boxed{\text{rot}\, \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}}$$

$$rot\vec{E} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix}$$

Dạng vi phân của phương trình Maxwell-Faraday

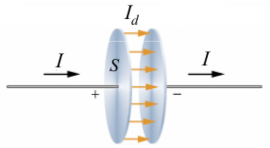
$$\operatorname{rot}\vec{E} = \vec{i}\left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right) + \vec{j}\left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\right) + \vec{k}\left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right)$$

Ý nghĩa: Xác định cường độ điện trường khi biết quy luật biến đổi của từ trường theo thời gian.

1. Dòng điện dịch và luận điểm thứ hai của Maxwell

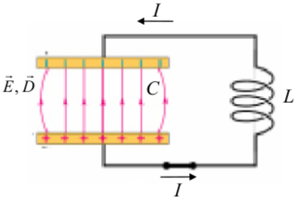
Luận điểm của Maxwell:

- Bất kỳ một điện trường biến đổi theo thời gian cũng sinh ra một từ trường
- Dòng điện dịch là dòng điện tương đương với điện trường biến đổi theo thời gian về phương diện sinh ra từ trường.



Mạch điện có L và C:

- Tụ điện phóng điện ⇒ dòng điện trong mạch chạy qua cuộn dây L hướng từ bản $(+) \rightarrow (-)$, $\vec{E}$ và $\vec{D}$ trong không gian giữa 2 bản cực giảm.
- Tụ điện nạp điện ⇒ dòng điện trong mạch chạy qua cuộn dây L hướng từ bản $(-) \rightarrow (+)$, $\vec{E}$ và $\vec{D}$ trong không gian giữa 2 bản cực tăng ⇒ dòng điện dịch I_d chạy từ bản $(+) \rightarrow (-)$, cùng chiều với vector $\vec{D}$.



2. Mật độ dòng điện dịch

Về phương diện sinh ra từ trường, điện trường biến đổi theo thời gian $\Leftrightarrow$ dòng điện dịch I_d có cùng chiều và độ lớn như dòng điện dẫn.

- Khi tụ phóng điện, vector điện cảm $\vec{D}$ đang giảm $\Rightarrow$ dòng điện dịch I_d chạy từ bản $(-) \rightarrow (+)$, ngược chiều với vector $\vec{D}$.
- Khi tụ nạp điện, vector điện cảm $\vec{D}$ đang tăng $\Rightarrow$ dòng điện dịch I_d chạy từ bản $(+) \rightarrow (-)$, cùng chiều với vector $\vec{D}$.

Mật độ dòng điện dịch (trong chân không):

$$J_d = \frac{I_d}{S} = \frac{I}{S} = \frac{1}{S}\frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{q}{S}\right) = \frac{d\sigma}{dt}$$

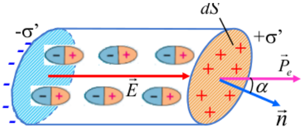
Vì $D = \sigma \Rightarrow J_d = \dfrac{dD}{dt}$

$$\boxed{\vec{J}_d = \frac{d\vec{D}}{dt}} \Leftrightarrow \boxed{\vec{J}_d = \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}}$$

Véctơ mật độ dòng điện dịch bằng tốc độ biến thiên theo thời gian của véctơ cảm ứng điện.

Dòng điện dịch và luận điểm thứ hai của Maxwell

Xét về phương diện sinh ra từ trường, thì bất kỳ điện trường nào biến đổi theo thời gian cũng giống như một dòng điện, gọi là dòng điện dịch, có véctơ mật độ dòng bằng: $\vec{J}_d = \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t}$



- Đối với chất điện môi: $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}_e$
- Mật độ dòng điện dịch trong chất điện môi:

$$\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}_e}{\partial t}$$

  - Chất điện môi: mật độ điện tích mặt liên kết $\sigma' = P_{en}$
  - Dòng qua dS: $I_{pc} = \int_S \vec{J}_{pc} d\vec{S} = \int_S \frac{\partial \sigma'}{\partial t} dS = \int_S \frac{\partial P_{en}}{\partial t} dS = \int_S \frac{\partial \vec{P}_e}{\partial t} d\vec{S}$

$$\vec{J}_{pc} = \frac{\partial \vec{P}_e}{\partial t} \Rightarrow \vec{J}_d = \vec{J}_{d(\text{chân không})} + \vec{J}_{d(\text{phân cực})}$$

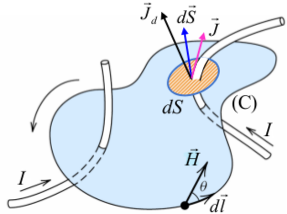
Dòng điện phân cực: liên quan đến sự quay của các lưỡng cực phân tử hay sự dịch chuyển của các trọng tâm điện tích (âm, dương) $\Leftrightarrow$ sự dịch chuyển của các điện tích $\Rightarrow$ dòng điện dịch.

Thiết lập phương trình Maxwell-Ampère

Theo Maxwell, từ trường do dòng điện dẫn và sự biến đổi của điện trường theo thời gian sinh ra.

- Mật độ dòng toàn phần là tổng của dòng điện dẫn và dòng điện dịch:

$$\vec{J}_{tp} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \Rightarrow I_{tp} = \int_S \vec{J}_{tp} d\vec{S} = \int_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}$$



- Định lý Ampere: $\oint \vec{H} d\vec{\ell} = I_{tp}$
- Phương trình Maxwell-Ampère dạng tích phân:

$$\boxed{\oint \vec{H} d\vec{\ell} = \int_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}}$$

– Vế trái theo định lý Stokes:

$$\oint \vec{H} d\vec{\ell} = \int_S (\nabla \times \vec{H}) d\vec{S} = \int_S \text{rot}\, \vec{H} . d\vec{S}$$

- Phương trình Maxwell-Ampère dạng vi phân:

$$\boxed{\text{rot}\, \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}}$$

1. Trường điện từ

–Từ trường biến đổi sinh ra điện trường (khép kín) và điện trường biến đổi cũng sinh ra từ trường
–Từ trường và điện trường đồng thời tồn tại, cũng như có mối liên hệ với nhau

$\Rightarrow$ tạo thành một trường thống nhất gọi là trường điện từ.

Điện trường và từ trường đồng thời tồn tại trong không gian tạo thành một trường thống nhất gọi là trường điện từ.

$\Rightarrow$ Trường điện từ là một dạng vật chất đặc trưng cho tương tác giữa các hạt mang điện.

1. Trường điện từ

- Năng lượng trường điện từ tồn tại và định xứ trong không gian có trường.

– Mật độ năng lượng trường điện từ bằng tổng mật độ năng lượng của điện trường và từ trường:

$$w = w_e + w_m = \frac{1}{2}(\epsilon_0 \epsilon E^2 + \mu_0 \mu H^2) = \frac{1}{2}(ED + BH)$$

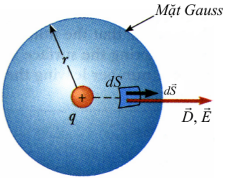
- Năng lượng trường điện từ:

$$W = \int_V w dV = \frac{1}{2}\int_V (\epsilon_0 \epsilon E^2 + \mu_0 \mu H^2) dV = \frac{1}{2}\int_V (ED + BH) dV$$

2. Hệ các phương trình Maxwell

Định lý Ôxtrôgrtxki-Gauss đối với điện trường

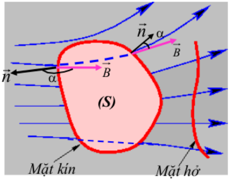
$$\begin{cases} -\text{Dạng tích phân: } \boxed{\oint_S \vec{D}.d\vec{S} = \sum q = \int_S \rho dV} \\ -\text{Dạng vi phân: } \boxed{\vec{\nabla}.\vec{D} = \operatorname{div} \vec{D} = \rho} \end{cases}$$



$$\Rightarrow \begin{cases} -\text{Diễn tả tính không khép kín của đường sức điện trường tĩnh} \\ -\text{Điện trường tĩnh có thể tồn tại với chỉ một nguồn duy nhất (1 điện tích)} \end{cases}$$

Định lý Oxtrogratxki-Gauss đối với từ trường

$$\begin{cases} -\text{Dạng tích phân: } \boxed{\oint \vec{B}.d\vec{S} = 0} \\ -\text{Dạng vi phân: } \boxed{\vec{\nabla}.\vec{B} = \operatorname{div} \vec{B} = 0} \end{cases}$$



$$\Rightarrow \begin{cases} -\text{Diễn tả tính khép kín của đường sức từ trường} \\ -\text{Từ trường chỉ có thể tồn tại dưới dạng nguồn lưỡng cực} \end{cases}$$

2. Hệ các phương trình Maxwell

Các phương trình dạng tích phân	Các phương trình dạng vi phân

Từ trường biến thiên theo thời gian sinh ra điện trường xoáy

$$\boxed{\oint_{(C)} \vec{E}d\vec{\ell} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}.d\vec{S}} \qquad \boxed{\text{rot } \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}}$$

Đường sức từ trường là đường khép kín (tính bảo toàn của từ thông)

$$\boxed{\oint \vec{B}.d\vec{S} = 0} \qquad \boxed{\text{div } \vec{B} = 0}$$

Điện trường biến thiên theo thời gian sinh ra từ trường

$$\boxed{\oint_S \vec{H}.d\vec{\ell} = \int_S \left(J + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}.d\vec{S}\right)} \qquad \boxed{\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}}$$

Điện thông gửi qua mặt kín bất kỳ = tổng đại số điện tích trong đó

$$\boxed{\oint_S \vec{D}.d\vec{S} = \sum q = \int_V \rho dV} \qquad \boxed{\vec{\nabla}.\vec{D} = \text{div } \vec{D} = \rho}$$

Các phương trình liên hệ trường

Trong môi trường đồng chất và đẳng hướng

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} \qquad \vec{J} = \sigma \vec{E} \qquad \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$$

Dạng vi phân

$$\begin{array}{cc} \text{rot}\,\vec{E} = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{rot}\,\vec{H} = \vec{J} + \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \text{div}\,\vec{D} = \rho & \text{div}\,\vec{B} = 0 \end{array}$$

Điện trường và từ trường

$$\begin{array}{cc} \vec{E} = \vec{E}(x, y, z) & \vec{H} = \vec{H}(x, y, z) \\ \vec{D} = \vec{D}(x, y, z) & \vec{B} = \vec{B}(x, y, z) \end{array}$$

Các phương trình liên hệ trường

Điện trường tĩnh

$$\vec{E} = \vec{E}(x, y, z)$$
$$\vec{D} = \vec{D}(x, y, z)$$
$$\vec{B} = 0 \quad \vec{H} = 0$$
$$\oint_C \vec{E} d\vec{\ell} = 0 \quad \text{rot}\, \vec{E} = 0$$
$$\oint_C \vec{D} d\vec{S} = \sum_i q_i \quad \text{div}\, \vec{D} = \rho$$
$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$$

Từ trường tĩnh

$$\vec{H} = \vec{H}(x, y, z)$$
$$\vec{B} = \vec{B}(x, y, z)$$
$$\vec{D} = 0 \quad \vec{E} = 0$$
$$\oint_C \vec{H} d\vec{\ell} = \mathcal{I} \quad \text{rot}\, \vec{H} = J$$
$$\oint_C \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad \text{div}\, \vec{B} = 0$$
$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$$

Ý nghĩa của hệ các phương trình Maxwell

Các phương trình Maxwell là các phương trình cơ bản về điện và từ.

- Đoán nhận trước sự tồn tại của sóng điện từ, tức là sự lan truyền trong không gian của một trường điện từ biến đổi theo thời gian.
- Xây dựng nên thuyết điện từ về ánh sáng. Theo thuyết này, ánh sáng thấy được là những sóng điện từ có bước sóng từ $0,38\mu m \rightarrow 0,76\mu m$.
- Trước thực nghiệm 20 năm.
- Là cơ sở hoạt động của mọi thứ thiết bị điện từ và quang học: môtơ điện, kính thiên văn, kính đeo mắt, máy thu phát truyền hình, điện thoại, nam châm điện, ra đa...