
ĐOÀN THỂ NGÔ VINH

Giáo trình

ĐIỆN ĐỘNG LỰC HỌC

Vinh, 2010

Mục lục

Giới thiệu	1
1 Các phương trình cơ bản của trường điện từ	2
1.1 Các khái niệm cơ bản	2
1.1.1 Trường điện từ	2
1.1.2 Các đại lượng điện từ	2
1.1.3 Điện tích	3
1.1.4 Dòng điện	3
1.2 Định luật Coulomb	4
1.2.1 Định luật Coulomb	4
1.2.2 Dạng vi phân của định luật tĩnh điện Gauss	5
1.3 Định luật dòng toàn phần	5
1.3.1 Định luật bảo toàn điện tích	5
1.3.2 Dòng điện dịch	6
1.3.3 Dạng vi phân của định luật dòng toàn phần	7
1.4 Nguyên lý về tính liên tục của từ thông	8
1.5 Định luật cảm ứng điện từ Faraday	8
1.6 Định luật Ohm và định luật Joule – Lentz	9
1.6.1 Dạng vi phân của định luật Ohm	9
1.6.2 Dạng vi phân của định luật Joule – Lentz	9
1.7 Hệ phương trình Maxwell	10
1.7.1 Hệ phương trình Maxwell dạng vi phân	10
1.7.2 Hệ phương trình Maxwell dạng tích phân	10
1.7.3 Ý nghĩa và điều kiện áp dụng	10
1.8 Năng lượng của trường điện từ	11
1.9 Xung lượng của trường điện từ	12
1.10 Các điều kiện biên	14
1.10.1 Điều kiện biên của vectơ $\vec{B}$	14
1.10.2 Điều kiện biên của vectơ $\vec{D}$	15
1.10.3 Điều kiện biên của vectơ $\vec{E}$	15
1.10.4 Điều kiện biên của vectơ $\vec{H}$	16
2 Trường điện từ tĩnh	17
2.1 Các phương trình của trường điện từ tĩnh	17
2.1.1 Định nghĩa trường điện từ tĩnh	17
2.1.2 Các phương trình của trường điện từ tĩnh	17
2.2 Thế vô hướng	18
2.2.1 Trường điện tĩnh trong môi trường đồng chất. Thế vô hướng	18

2.2.2	Phương trình vi phân của thế vô hướng	18
2.3	Điện thế của một hệ điện tích	20
2.3.1	Điện thế của một điện tích điểm	20
2.3.2	Điện thế của hệ n điện tích điểm	20
2.3.3	Điện thế của một hệ điện tích phân bố liên tục	20
2.3.4	Điện thế của một lưỡng cực điện	21
2.4	Vật dẫn trong trường điện tĩnh	21
2.4.1	Vật dẫn trong trường điện tĩnh	21
2.4.2	Điện dung của một vật dẫn cô lập	22
2.4.3	Hệ số điện dung và hệ số cảm ứng của hệ vật dẫn	22
2.5	Điện môi đặt trong trường điện tĩnh	24
2.5.1	Sự phân cực của điện môi	24
2.5.2	Thế vô hướng tại mỗi điểm trong điện môi	24
2.5.3	Mối liên hệ giữa độ cảm điện môi và hệ số điện môi	25
2.6	Năng lượng của trường điện tĩnh	26
2.6.1	Biểu diễn năng lượng của trường điện tĩnh qua thế vô hướng	26
2.6.2	Năng lượng của một hệ điện tích điểm	26
2.6.3	Năng lượng của một hệ vật dẫn tích điện	27
2.6.4	Năng lượng của hệ điện tích đặt trong điện trường	27
2.7	Lực tác dụng trong trường điện tĩnh	28
3	Trường điện từ dừng	29
3.1	Các phương trình của trường điện từ	29
3.1.1	Trường điện từ dừng	29
3.1.2	Các phương trình của trường điện từ dừng	29
3.2	Các định luật cơ bản của dòng điện không đổi	30
3.2.1	Định luật Ohm	30
3.2.2	Định luật Joule – Lentz	31
3.2.3	Định luật Kirchhoff thứ nhất	31
3.2.4	Định luật Kirchhoff thứ hai	32
3.3	Thế vectơ. Định luật Biot – Savart	32
3.3.1	Thế vectơ	32
3.3.2	Phương trình vi phân của thế vectơ	33
3.3.3	Định luật Biot – Savart	33
3.4	Từ trường của dòng nguyên tố	35
3.5	Từ môi trong từ trường không đổi	36
3.5.1	Sự từ hóa của từ môi	36
3.5.2	Thế vectơ của từ trường khi có từ môi	37
3.5.3	Mối liên hệ giữa độ cảm từ và độ từ thẩm	39
3.6	Năng lượng của từ trường dừng	39
3.6.1	Biểu diễn năng lượng của từ trường dừng qua thế vectơ	39
3.6.2	Năng lượng của hệ dòng dừng. Hệ số tự cảm và hệ số hỗ cảm	40
3.7	Lực tác dụng trong từ trường dừng	42
3.7.1	Lực của từ trường	42
3.7.2	Lực từ tác dụng lên dòng nguyên tố	42
3.7.3	Năng lượng của dòng nguyên tố đặt trong từ trường ngoài	44
3.7.4	Mômen lực tác dụng lên dòng nguyên tố	44

4	Trường điện từ chuẩn dừng	45
4.1	Các phương trình của trường chuẩn dừng	45
4.1.1	Các điều kiện chuẩn dừng	45
4.1.2	Các phương trình của trường chuẩn dừng	46
4.1.3	Thế vectơ và thế vô hướng của trường điện từ chuẩn dừng	47
4.1.4	Các phương trình vi phân của thế	47
4.2	Các mạch chuẩn dừng	47
4.2.1	Hệ dây dẫn có cảm ứng điện từ	47
4.2.2	Mạch điện có điện dung và tự cảm	48
4.2.3	Các ví dụ	50
4.3	Hiệu ứng mặt ngoài	52
4.4	Năng lượng của các mạch chuẩn dừng	54
5	Sóng điện từ	56
5.1	Các phương trình của trường điện từ biến thiên nhanh	56
5.1.1	Các phương trình của trường biến thiên nhanh	56
5.1.2	Thế vô hướng và thế vectơ của trường điện từ biến thiên nhanh	57
5.1.3	Phương trình vi phân của thế vô hướng và thế vectơ	57
5.1.4	Nghiệm của phương trình thế. Thế trễ	58
5.2	Sự bức xạ của lưỡng cực	59
5.2.1	Định nghĩa lưỡng cực bức xạ	59
5.2.2	Thế vô hướng của lưỡng cực bức xạ	60
5.2.3	Thế vectơ của lưỡng cực bức xạ	60
5.2.4	Điện từ trường của dao động tử tuyến tính	61
5.2.5	Tính chất điện từ trường của dao động tử tuyến tính	63
5.2.6	Lưỡng cực bức xạ tuần hoàn	63
5.3	Trường điện từ tự do	64
5.3.1	Các phương trình của trường điện từ tự do	64
5.3.2	Sóng điện từ phẳng	65
5.4	Sóng điện từ phẳng đơn sắc	65
5.5	Sóng điện từ trong chất dẫn điện	67
5.6	Sự phản xạ và khúc xạ sóng điện từ	68
5.6.1	Điều kiện biên đối với các vectơ sóng	68
5.6.2	Các định luật phản xạ và khúc xạ sóng điện từ	69
5.6.3	Hệ số phản xạ và khúc xạ	70
6	Tương tác giữa điện tích và điện từ trường	73
6.1	Các phương trình cơ bản của thuyết electron	73
6.1.1	Đặc điểm của điện động lực học vĩ mô và vi mô	73
6.1.2	Các phương trình cơ bản của thuyết electron	73
6.2	Mối quan hệ giữa điện động lực học vĩ mô và vi mô	75
6.2.1	Giá trị trung bình của hàm số	75
6.2.2	Phép lấy trung bình điện từ trường	75
6.2.3	Phép lấy trung bình mật độ dòng điện	76
6.2.4	Phép lấy trung bình mật độ điện tích	76
6.2.5	Mối quan hệ giữa các phương trình Maxwell và các phương trình Maxwell – Lorentz	77
6.3	Chuyển động của điện tích tự do trong trường điện từ	78

6.3.1	Phương trình chuyển động của điện tích trong trường điện từ	78
6.3.2	Chuyển động của điện tích trong trường tĩnh điện	78
6.3.3	Chuyển động của điện tích trong từ trường dừng	79
6.4	Chuyển động của electron trong nguyên tử đặt vào từ trường ngoài	81
6.4.1	Ảnh hưởng của từ trường ngoài lên dao động và bức xạ của nguyên tử	81
6.4.2	Chuyển động tiến động của electron	82
7	Điện môi và từ môi	85
7.1	Sự phân cực của điện môi trong điện trường	85
7.1.1	Sự phân cực của các điện môi có phân tử không cực	85
7.1.2	Sự phân cực của các điện môi có phân tử có cực	87
7.1.3	Nhận xét	89
7.2	Thuyết cổ điển về tán sắc	89
7.2.1	Hiện tượng tán sắc	89
7.2.2	Hiện tượng tán sắc thường và tán sắc dị thường	90
7.3	Nghịch từ và thuận từ	92
7.3.1	Nghịch từ	92
7.3.2	Thuận từ	93
7.4	Thuyết cổ điển về sắt từ	94

Giới thiệu

Điện động lực là học thuyết về trường điện từ và sự liên hệ giữa nó với điện tích và dòng điện. Điện động lực học cổ điển được xét theo hai quan điểm vĩ mô và vi mô.

Điện động lực học vĩ mô nghiên cứu các hiện tượng điện từ không quan tâm tới tính gián đoạn của các điện tích và cấu trúc phân tử, nguyên tử của môi trường vật chất. Các vật thể được coi là các môi trường liên tục, và điện tích cũng được coi là phân bố liên tục trong không gian. Điện động lực học vĩ mô dựa trên hệ phương trình Maxwell, được xem như một tiên đề tổng quát, từ đó bằng suy luận logic và bằng phương pháp chứng minh toán học chặt chẽ để rút ra các kết luận khác về các hiện tượng điện từ.

Điện động lực học vi mô nghiên cứu các hiện tượng điện từ có xét đến cấu trúc phân tử, nguyên tử của môi trường vật chất và tính gián đoạn của các điện tích. Ở đây dựa trên hệ phương trình Maxwell – Lorentz để khảo sát. Phương pháp này cho phép giải thích được cơ cấu và hiểu được bản chất của nhiều hiện tượng điện từ mà điện động lực học vĩ mô chỉ có thể mô tả về mặt hình thức.

Điện động lực học vi mô có quan hệ với điện động lực học vĩ mô qua việc lấy trung bình các đại lượng điện từ vi mô để nhận được các đại lượng điện từ vĩ mô tương ứng.

Trong giáo trình này phần điện động lực học vĩ mô được trình bày trong năm chương đầu

Chương 1 Các phương trình cơ bản của trường điện từ.

Chương 2 Trường điện từ tĩnh.

Chương 3 Trường điện từ dừng.

Chương 4 Trường điện từ chuẩn dừng.

Chương 5 Sóng điện từ.

phần điện động lực học vi mô được trình bày trong hai chương cuối

Chương 6 Tương tác giữa điện tích và điện trường.

Chương 7 Điện môi và từ môi.

Để học được học phần này người học phải được trang bị các kiến thức cơ sở như toán cao cấp đặc biệt là giải tích vectơ, điện đại cương, cơ học đại cương, cơ học lý thuyết.

Mặc dù đã có rất nhiều cố gắng nhưng chắc giáo trình này sẽ không tránh khỏi các hạn chế. Tác giả chân thành cảm ơn các ý kiến đóng góp từ độc giả để giáo trình này ngày càng được hoàn thiện hơn. Mọi ý kiến xin gửi về Đoàn Thế Ngô Vinh, Khoa Vật lý, Đại học Vinh, hoặc email: doanvinhdhv@gmail.com

TP Vinh, tháng 9 năm 2010.

Đoàn Thế Ngô Vinh

Chương 1

Các phương trình cơ bản của trường điện từ

1.1 Các khái niệm cơ bản

1.1.1 Trường điện từ

Trường điện từ là khoảng không gian vật lý trong đó có tồn tại lực điện và lực từ. Tại mỗi điểm của trường điện từ được đặc trưng bởi bốn vectơ: vectơ cường độ điện trường $\vec{E}$, vectơ cảm ứng điện (còn gọi là vectơ điện dịch) $\vec{D}$, vectơ cường độ từ trường $\vec{H}$, vectơ cảm ứng từ $\vec{B}$. Bốn vectơ này là những hàm của tọa độ và thời gian, chúng không biến thiên một cách bất kỳ mà tuân theo những quy luật nhất định, những quy luật đó được mô tả dưới dạng các phương trình Maxwell mà ta sẽ nghiên cứu trong chương này.

1.1.2 Các đại lượng điện từ

Các đại lượng vectơ $\vec{E}$, $\vec{D}$, $\vec{H}$ và $\vec{B}$ nói chung là các hàm của tọa độ và thời gian, chúng xác định mọi quá trình điện từ ở trong chân không cũng như trong môi trường vật chất. Đối với môi trường đẳng hướng ta có:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.1)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.2)$$

Trong đó ϵ và μ tương ứng là hệ số điện thẩm và hệ số từ thẩm của môi trường, các hệ số này nói chung là những hàm của tọa độ, thời gian và cường độ của trường điện từ. Tuy nhiên để đơn giản chỉ xét trường hợp ϵ và μ là các hằng số.

Trong hệ đơn vị SI các đại lượng trên có đơn vị và thứ nguyên như sau:

$\vec{E}$	Vm^{-1}	$[\text{m.kg.s}^{-3}.\text{A}^{-1}]$
$\vec{D}$	Cm^{-2}	$[\text{m}^{-2}.\text{s.A}]$
$\vec{H}$	Am^{-1}	$[\text{m}^{-1}.\text{A}]$
$\vec{B}$	T	$[\text{kg.s}^{-2}.\text{A}^{-1}]$
ϵ	Fm^{-1}	$[\text{m}^{-3}.\text{kg}^{-1}.\text{s}^4.\text{A}^2]$
μ	Hm^{-1}	$[\text{m.kg.s}^2.\text{A}^{-2}]$

Trong chân không $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi} 9 \cdot 10^{-9} \text{ Fm}^{-1}$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$. Thực nghiệm chứng tỏ rằng $\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$, c là vận tốc ánh sáng trong chân không¹. Ngoài ra người ta còn định nghĩa:

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}; \quad \mu' = \frac{\mu}{\mu_0}$$

là hệ số điện môi tỷ đối và hệ số từ thẩm tỷ đối của môi trường. Chúng là những đại lượng không có thứ nguyên.

1.1.3 Điện tích

Trong điện động lực học vĩ mô điện tích được coi là phân bố liên tục trong không gian.

Nếu điện tích phân bố liên tục trong một thể tích V nào đó, ta định nghĩa mật độ điện tích khối tại mỗi điểm là:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V} \quad (1.3)$$

Trong đó ΔV là thể tích nhỏ bất kỳ bao quanh điểm quan sát, Δq là lượng điện tích chứa trong thể tích đó. Đơn vị mật độ điện tích khối Cm^{-3} .

Nếu điện tích phân bố liên tục trên một mặt S nào đó ta định nghĩa mật độ điện tích mặt tại mỗi điểm là:

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta S} \quad (1.4)$$

trong đó ΔS là diện tích nhỏ bất kỳ bao quanh điểm quan sát, Δq là điện tích có ở trong ΔS . Đơn vị của mật độ điện tích mặt là Cm^{-2} .

Đối với điện tích điểm thì điện tích tập trung tại một điểm, mật độ điện tích bằng dần tới vô cùng tại nơi có điện tích điểm. Khi đó ta có thể biểu diễn mật độ điện tích dưới dạng hàm Delta².

$$\rho = \sum q_i \delta(\vec{r} - \vec{r}_i) \quad (1.5)$$

$\vec{r}_i$ là bán kính vectơ của điện tích còn $\vec{r}$ là bán kính vectơ của điểm quan sát.

Do các định nghĩa trên, giá trị của điện tích nguyên tố có thể viết:

$$dq = \rho dV \quad (1.6)$$

$$dq = \sigma dS \quad (1.7)$$

1.1.4 Dòng điện

Trong điện động lực học vĩ mô dòng điện cũng được xem là phân bố liên tục trong không gian và đó là dòng chuyển dời có hướng của các điện tích.

Nếu dòng điện phân bố liên tục trong thể tích nào đó, ta định nghĩa mật độ dòng điện khối $\vec{j}$ tại mỗi điểm bằng hệ thức:

$$\vec{j} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta S} \quad (1.8)$$

¹vận tốc ánh sáng trong chân không xấp xỉ $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$

²Hàm Delta $\delta(\vec{r} - \vec{r}_i) = \begin{cases} \infty & (\vec{r} = \vec{r}_i) \\ 0 & (\vec{r} \neq \vec{r}_i) \end{cases}$

trong đó ΔI là cường độ dòng điện chạy qua mặt nhỏ bất kỳ ΔS chứa điểm quan sát và vuông góc với phương của dòng điện tại điểm quan sát. Phương và chiều của vectơ $\vec{j}$ trùng với phương và chiều của dòng điện tại điểm quan sát. Đơn vị của mật độ dòng điện là Am^{-2} .

Nếu dòng điện được phân bố liên tục trên một mặt bất kỳ nào đó. Ta định nghĩa mật độ dòng điện mặt $\vec{i}$ tại mỗi điểm bằng hệ thức:

$$|\vec{i}| = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta l} \quad (1.9)$$

trong đó ΔI là cường độ dòng điện mặt chạy qua một đoạn bất kỳ Δl chứa điểm quan sát và vuông góc với dòng điện tại điểm quan sát. Phương, chiều của vectơ $\vec{i}$ trùng với phương và chiều của dòng điện tại điểm quan sát.

Do các định nghĩa trên, giá trị của dòng điện nguyên tố là:

$$dI = \vec{j} d\vec{S} = j_n dS = j dS \cos \alpha \quad (1.10)$$

$$dI = \vec{i} d\vec{l} = i_n dl = i dl \cos \alpha \quad (1.11)$$

α là góc hợp bởi vectơ $\vec{j}$ (hoặc vectơ $\vec{i}$) với pháp tuyến $\vec{n}$ của $d\vec{S}$ (hoặc $d\vec{l}$).

1.2 Định luật Coulomb

1.2.1 Định luật Coulomb

Lực tác dụng giữa hai điện tích điểm q và q' đặt trong môi trường đồng nhất có hệ số điện thẩm ε cho bởi

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \frac{qq'}{r^2} \quad (1.12)$$

r là khoảng cách giữa hai điện tích

Trên cơ sở lý thuyết trường tương tác giữa hai điện tích điểm q và q' có thể giải thích:

- (a) điện tích điểm q tạo ra quanh nó điện trường có cường độ điện trường

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad (1.13)$$

$\vec{r}$ là bán kính vectơ tính từ điện tích q đến điểm tính trường

- (b) điện tích điểm q' đặt trong điện trường chịu tác dụng của lực

$$\vec{F} = q' \vec{E} \quad (1.14)$$

Có thể coi (1.14) là cách biểu diễn khác của định luật Coulomb, nó phù hợp với nguyên lý tác dụng gần, đúng cho mọi trường hợp và không phụ thuộc vào nguyên nhân gây ra điện trường $\vec{E}$. Còn (1.12) phù hợp với nguyên lý tác dụng xa, biểu diễn tương tác tức thời giữa hai điện tích và chỉ đúng trong trường hợp các điện tích chuyển động chậm và khoảng cách giữa chúng không lớn lắm.

Theo (1.13) cường độ điện trường phụ thuộc vào phân bố điện tích trong không gian và hệ số điện thẩm của môi trường. Để thuận tiện tính toán người

ta đưa vào vectơ cảm ứng điện hay vectơ điện dịch theo (1.1). Đối với điện tích điểm q ta có

$$\vec{D} = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad (1.15)$$

Vectơ cảm ứng điện chỉ phụ thuộc vào phân bố điện tích trong không gian mà không phụ thuộc tính chất của môi trường.

1.2.2 Dạng vi phân của định luật tĩnh điện Gauss

Giả sử trong mặt kín S có một lượng điện tích q . Theo định luật tĩnh điện Gauss ta có

$$N = \oint_S \vec{D} d\vec{S} = q \quad (1.16)$$

N là thông lượng của vectơ cảm ứng điện $\vec{D}$ gửi qua mặt kín S . Ta có $q = \int dq = \int_V \rho dV$ nên (1.16) trở thành

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV$$

Mặt khác $\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \text{div} \vec{D} dV$ nên $\int_V \text{div} \vec{D} dV = \int_V \rho dV$. Do mặt S và thể tích V do nó bao bọc được chọn bất kỳ nên

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (1.17)$$

đó là dạng vi phân của định luật tĩnh điện Gauss.

Từ (1.17) nếu trong thể tích V nào đó mà $\rho = 0$ thì thông lượng của vectơ cảm ứng điện gửi qua mặt kín S bao thể tích V bằng không, nghĩa là đường sức của vectơ $\vec{D}$ không bắt đầu và cũng không kết thúc trong V . Tại những điểm có $\rho \neq 0$ thì đường sức của vectơ $\vec{D}$ bắt đầu ($\rho > 0$) hoặc kết thúc ($\rho < 0$) tại đó. Như vậy mật độ điện tích ρ là nguồn của vectơ $\vec{D}$.

1.3 Định luật dòng toàn phần

1.3.1 Định luật bảo toàn điện tích

Xét thể tích V không đổi được giới hạn bởi mặt kín S không đổi, trong đó chứa điện tích $q = \int_V \rho dV$. Giả sử điện tích trong V thay đổi theo thời gian, trong đơn vị thời gian nó biến đổi một lượng

$$\frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt} \int_V \rho dV = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$$

Điện tích được bảo toàn nên phải có dòng điện tích (dòng điện) chảy qua mặt kín S . Dòng điện chảy vào nếu điện tích trong V tăng, chảy ra nếu điện tích trong V giảm. Xét nguyên tố mặt dS trên mặt kín S . Trong đơn vị thời gian điện lượng chảy qua dS (chính là cường độ dòng điện chảy qua dS) là $dI = \rho \vec{v} dS = \vec{j} dS$. Với $\vec{v}$ là vận tốc của điện tích tại dS . Do đó

$$\vec{j} = \rho \vec{v} \quad (1.18)$$