

Tổng hợp kiến thức: Mạch dao động LC và Năng lượng điện từ

Phần I: Đại cương về mạch dao động LC

1. Mạch dao động LC là gì?

Mạch dao động LC là một mạch điện kín gồm một cuộn cảm thuần có độ tự cảm L mắc nối tiếp với một tụ điện có điện dung C .

- **Cuộn cảm (L):** Tích trữ năng lượng dưới dạng năng lượng từ trường khi có dòng điện chạy qua.
- **Tụ điện (C):** Tích trữ năng lượng dưới dạng năng lượng điện trường khi được tích điện.

Khi mạch hoạt động, có sự chuyển hóa qua lại giữa năng lượng điện trường trong tụ điện và năng lượng từ trường trong cuộn cảm. Quá trình này tạo ra một dao động điện từ trong mạch.

2. Dao động điện từ tự do

Dao động điện từ tự do là sự biến thiên điều hòa theo thời gian của điện tích q trên một bản tụ điện và cường độ dòng điện i trong mạch dao động. Dao động này xảy ra trong mạch dao động LC lý tưởng (có điện trở thuần $R = 0$), không có sự mất mát năng lượng.

3. Khảo sát dao động trong mạch LC (Phương trình dao động)

Giả sử tại thời điểm ban đầu, tụ điện được tích điện đến điện tích cực đại Q_0 rồi nối vào mạch. Tụ điện bắt đầu phóng điện qua cuộn cảm, tạo ra dòng điện trong mạch. Dòng điện này lại tạo ra từ trường trong cuộn cảm, và quá trình chuyển hóa năng lượng bắt đầu.

a. Phương trình điện tích (q)

- **Công thức:** $q = Q_0 \cos(\omega t + \varphi)$

- **Giải thích:**

- **q :** điện tích tức thời trên một bản tụ điện (đơn vị: C).
- **Q_0 :** điện tích cực đại (biên độ điện tích) (đơn vị: C).
- **ω :** tần số góc của dao động (đơn vị: rad/s).
- **$(\omega t + \varphi)$:** pha dao động tại thời điểm t .
- **φ :** pha ban đầu, phụ thuộc vào cách chọn gốc thời gian.

- **Ví dụ:** Một mạch dao động LC có điện tích cực đại là $4 \cdot 10^{-6}$ C và tần số góc 2000 rad/s. Chọn gốc thời gian là lúc tụ điện bắt đầu phóng điện ($q = Q_0$).

Phương trình điện tích là: $q = 4 \cdot 10^{-6} \cos(2000t)$ (C).

b. Phương trình cường độ dòng điện (i)

Cường độ dòng điện là đạo hàm của điện tích theo thời gian: $i = q'$.

- **Công thức:** $i = -\omega Q_0 \sin(\omega t + \varphi) = I_0 \cos(\omega t + \varphi + \pi/2)$

- **Giải thích:**

- **i**: cường độ dòng điện tức thời trong mạch (đơn vị: A).
- **$I_0 = \omega Q_0$** : cường độ dòng điện cực đại (biên độ dòng điện) (đơn vị: A).
- Từ phương trình, ta thấy dòng điện **sớm pha hơn điện tích một góc $\pi/2$** .

- **Ví dụ 1:** Tiếp ví dụ trên, phương trình dòng điện sẽ là: $i = -2000 * 4 \cdot 10^{-6} \sin(2000t) = -8 \cdot 10^{-3} \sin(2000t)$ (A). Cường độ dòng điện cực đại $I_0 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 8 \text{ mA}$.
- **Ví dụ 2:** Một mạch dao động có phương trình điện tích $q = 5 \cos(1000\pi t + \pi/3) \mu\text{C}$. Phương trình dòng điện là $i = q' = -1000\pi * 5 \sin(1000\pi t + \pi/3) \mu\text{A} = 5\pi \cos(1000\pi t + \pi/3 + \pi/2) \text{ mA}$.

c. Phương trình hiệu điện thế (u)

Hiệu điện thế giữa hai bản tụ điện liên hệ với điện tích qua công thức $q = Cu$.

- **Công thức:** $u = q/C = (Q_0/C) \cos(\omega t + \varphi) = U_0 \cos(\omega t + \varphi)$
- **Giải thích:**
 - **u**: hiệu điện thế tức thời giữa hai bản tụ (đơn vị: V).
 - **$U_0 = Q_0/C$** : hiệu điện thế cực đại (biên độ hiệu điện thế) (đơn vị: V).
 - Từ phương trình, ta thấy hiệu điện thế **u cùng pha với điện tích q**.
- **Ví dụ:** Một mạch LC có $C = 2 \mu\text{F}$, phương trình điện tích $q = 6 \cdot 10^{-6} \cos(500t)$ C. Hiệu điện thế cực đại $U_0 = Q_0/C = 6 \cdot 10^{-6} / (2 \cdot 10^{-6}) = 3 \text{ V}$. Phương trình hiệu điện thế là $u = 3 \cos(500t)$ (V).

4. Chu kì và Tần số riêng của mạch dao động

- **Tần số góc riêng (ω):** $\omega = 1/\sqrt{LC}$ (rad/s)
- **Chu kì riêng (T):** Là khoảng thời gian để thực hiện một dao động toàn phần.
 $T = 2\pi/\omega = 2\pi\sqrt{LC}$ (s)
- **Tần số riêng (f):** Là số dao động toàn phần thực hiện được trong một giây. $f = 1/T = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ (Hz)

Ví dụ 1: Một mạch dao động gồm cuộn cảm $L = 2$ mH và tụ điện $C = 8$ pF. Tính tần số góc và chu kì dao động.

Đổi đơn vị: $L = 2 \cdot 10^{-3}$ H, $C = 8 \cdot 10^{-12}$ F.

Tần số góc: $\omega = 1/\sqrt{2 \cdot 10^{-3} * 8 \cdot 10^{-12}} = 1/\sqrt{16 \cdot 10^{-15}} = 1/(4 \cdot 10^{-7.5}) \approx 7.9 \cdot 10^6$ rad/s.

Chu kì: $T = 2\pi/\omega = 2\pi * 4 \cdot 10^{-7.5} \approx 7.9 \cdot 10^{-7}$ s.

Ví dụ 2: Một mạch dao động có tần số $f = 1$ MHz. Nếu điện dung $C = 10$ nF thì độ tự cảm L là bao nhiêu?

$f = 10^6$ Hz, $C = 10 \cdot 10^{-9}$ F.

Từ $f = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \Rightarrow f^2 = 1/(4\pi^2 LC) \Rightarrow L = 1/(4\pi^2 f^2 C) = 1/(4\pi^2 (10^6)^2 * 10 \cdot 10^{-9}) \approx 2.53 \cdot 10^{-6}$ H = 2.53 μ H.

Phần II: Năng lượng trong mạch dao động LC

Trong mạch dao động LC lý tưởng, năng lượng của mạch được bảo toàn và được gọi là năng lượng điện từ.

1. Năng lượng điện trường (W_c)

Là năng lượng được tích trữ trong tụ điện.

- **Công thức:** $W_c = \frac{1}{2}Cu^2 = \frac{q^2}{2C} = \frac{1}{2}C(U_0 \cos(\omega t + \varphi))^2$
- **Giải thích:** Năng lượng điện trường biến thiên tuần hoàn với tần số góc $\omega' = 2\omega$ và chu kì $T' = T/2$. W_c đạt giá trị cực đại khi tụ được tích điện cực đại ($u = \pm U_0$, $q = \pm Q_0$) và bằng 0 khi tụ phóng hết điện ($u = 0$, $q = 0$).
- **Ví dụ:** Mạch LC có $C = 5\mu F$ và hiệu điện thế cực đại $U_0 = 6V$. Năng lượng điện trường cực đại là $W_{c_max} = \frac{1}{2}CU_0^2 = \frac{1}{2} * 5 \cdot 10^{-6} * 6^2 = 9 \cdot 10^{-5} J$.

2. Năng lượng từ trường (W_L)

Là năng lượng được tích trữ trong cuộn cảm.

- **Công thức:** $W_L = \frac{1}{2}Li^2 = \frac{1}{2}L(-I_0 \sin(\omega t + \varphi))^2$
- **Giải thích:** Năng lượng từ trường cũng biến thiên tuần hoàn với tần số góc $\omega' = 2\omega$ và chu kì $T' = T/2$. W_L đạt giá trị cực đại khi dòng điện trong mạch cực đại ($i = \pm I_0$) và bằng 0 khi dòng điện tức thời bằng 0.
- **Ví dụ:** Mạch LC có $L = 0.2 H$ và dòng điện cực đại $I_0 = 50 mA = 0.05 A$. Năng lượng từ trường cực đại là $W_{L_max} = \frac{1}{2}LI_0^2 = \frac{1}{2} * 0.2 * (0.05)^2 = 2.5 \cdot 10^{-4} J$.

3. Năng lượng điện từ (W) và Định luật bảo toàn

Năng lượng điện từ là tổng năng lượng điện trường và năng lượng từ trường trong mạch.

- **Công thức:** $W = W_c + W_L = \frac{1}{2}Cu^2 + \frac{1}{2}Li^2 = \text{const}$
- **Bảo toàn năng lượng:** Trong mạch dao động lý tưởng, năng lượng điện từ được bảo toàn. Năng lượng này bằng giá trị cực đại của năng lượng điện trường hoặc năng lượng từ trường.

$$W = W_{C_max} = \frac{1}{2}CU_0^2 = Q_0^2/(2C)$$

$$W = W_{L_max} = \frac{1}{2}LI_0^2$$

$$\text{Do đó: } \frac{1}{2}CU_0^2 = \frac{1}{2}LI_0^2$$

- **Sự chuyển hóa:**

- Khi W_C giảm thì W_L tăng và ngược lại.
- Khi $W_C = W_{C_max}$ (tụ tích điện đầy) thì $W_L = 0$ ($i = 0$).
- Khi $W_L = W_{L_max}$ (dòng điện cực đại) thì $W_C = 0$ (tụ phóng hết điện).
- Khi $W_C = W_L$ thì $W = 2W_C = 2W_L$, lúc này $u = \pm U_0/\sqrt{2}$ và $i = \pm I_0/\sqrt{2}$.

- **Ví dụ:** Một mạch dao động LC có $L = 5 \text{ mH}$, $C = 50 \text{ } \mu\text{F}$. Hiệu điện thế cực đại là 10V .

a. Tính năng lượng điện từ: $W = \frac{1}{2}CU_0^2 = \frac{1}{2} * 50 \cdot 10^{-6} * 10^2 = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ J}$.

b. Tính cường độ dòng điện cực đại: $W = \frac{1}{2}LI_0^2 \Rightarrow I_0 = \sqrt{(2W/L)} = \sqrt{(2 * 2.5 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-3})} = 1 \text{ A}$.

c. Tại thời điểm hiệu điện thế tức thời $u = 6\text{V}$, tính cường độ dòng điện i .

Năng lượng điện trường lúc đó: $W_C = \frac{1}{2}Cu^2 = \frac{1}{2} * 50 \cdot 10^{-6} * 6^2 = 9 \cdot 10^{-4} \text{ J}$.

Áp dụng bảo toàn năng lượng: $W_L = W - W_C = 2.5 \cdot 10^{-3} - 9 \cdot 10^{-4} = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ J}$.

$$W_L = \frac{1}{2}Li^2 \Rightarrow i = \sqrt{(2W_L/L)} = \sqrt{(2 * 1.6 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-3})} = 0.8 \text{ A}.$$

Phần III: So sánh dao động điện từ và dao động cơ

Dao động điện từ trong mạch LC có sự tương tự với dao động cơ của hệ con lắc lò xo.

Đại lượng dao động cơ (Con lắc lò xo)	Đại lượng dao động điện từ (Mạch LC)
Li độ (x)	Điện tích (q)
Vận tốc ($v = x'$)	Cường độ dòng điện ($i = q'$)
Khối lượng (m)	Độ tự cảm (L)
Độ cứng (k)	Nghịch đảo điện dung ($1/C$)
Động năng ($Wđ = \frac{1}{2}mv^2$)	Năng lượng từ trường ($W_L = \frac{1}{2}Li^2$)
Thế năng ($Wt = \frac{1}{2}kx^2$)	Năng lượng điện trường ($W_c = \frac{1}{2}(1/C)q^2$)
Cơ năng ($W = Wđ + Wt$)	Năng lượng điện từ ($W = W_L + W_c$)

Phần IV: Dao động điện từ tắt dần và duy trì

1. Dao động điện từ tắt dần

Trong thực tế, cuộn cảm và dây nối luôn có điện trở thuần $R \neq 0$. Điện trở này làm tiêu hao năng lượng của mạch dưới dạng nhiệt (hiệu ứng Jun-Lenxơ). Do đó, năng lượng điện từ của mạch giảm dần, và biên độ dao động của q, i, u cũng giảm dần theo thời gian. Dao động đó gọi là dao động điện từ tắt dần.

2. Dao động điện từ duy trì

Để duy trì dao động với biên độ không đổi, ta phải bù lại phần năng lượng đã mất mát do điện trở R. Cách thực hiện là dùng một thiết bị (ví dụ như mạch dùng tranzito) để cung cấp năng lượng cho mạch một cách tuần hoàn, đúng

vào thời điểm thích hợp. Công suất cung cấp phải bằng công suất tiêu hao do tỏa nhiệt trên điện trở R: **$P_{\text{cung cấp}} = P_{\text{tỏa nhiệt}} = I^2 R$** , với I là cường độ dòng điện hiệu dụng.

VIDOCU.COM