

# 普通物理 ( 電磁學 ) 重點筆記

中央大學電機系許彧嘉

June 17, 2025

## Contents

|                             |          |
|-----------------------------|----------|
| 物理常數與重要符號                   | 1        |
| 易混淆觀念小提醒                    | 2        |
| <b>1 基本公式與定義</b>            | <b>2</b> |
| 1.1 電流密度、導體                 | 2        |
| 1.2 電阻                      | 2        |
| 1.3 歐姆定律                    | 2        |
| 1.4 磁場與帶電粒子運動               | 2        |
| 1.5 磁場與安培定律                 | 3        |
| 1.6 磁場單位                    | 3        |
| 1.7 通電直線、圓環、螺線管、環形線圈的磁場     | 3        |
| 1.8 電磁感應 ( 法拉第定律與楞次定律 )     | 3        |
| 1.9 自感與電感 ( Inductor )      | 3        |
| 1.10 電容、儲存能量                | 4        |
| <b>2 電路：RL、RC、LC、RLC 電路</b> | <b>4</b> |
| 2.1 RC 電路                   | 4        |
| 2.2 RL 電路                   | 4        |
| 2.3 LC 與 RLC 電路             | 5        |
| <b>3 交流電路與阻抗</b>            | <b>5</b> |
| 3.1 交流電壓                    | 5        |
| 3.2 電容元件                    | 5        |
| 3.3 電感元件                    | 6        |
| 3.4 RLC 並聯                  | 6        |

|                     |          |
|---------------------|----------|
| 3.5 相位關係 . . . . .  | 6        |
| <b>4 靜電學與高斯定律</b>   | <b>6</b> |
| 4.1 庫倫定律 . . . . .  | 6        |
| 4.2 電場與電勢 . . . . . | 6        |
| 4.3 高斯定律 . . . . .  | 6        |
| 4.4 導體性質 . . . . .  | 7        |
| 4.5 電容器 . . . . .   | 7        |
| <b>5 麥克斯威方程組</b>    | <b>7</b> |
| 常用向量微積分公式           | 7        |

## 物理常數與重要符號

- $\epsilon_0$ ：真空介電常數， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
- $\mu_0$ ：真空磁導率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$
- $c$ ：光速， $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$
- $k_e$ ：庫倫常數， $k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.99 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$
- $q$ ：電荷量，單位：C
- $I$ ：電流，單位：A
- $V$ ：電壓或電勢差，單位：V
- $R$ ：電阻，單位： $\Omega$
- $C$ ：電容，單位：F
- $L$ ：電感，單位：H
- $B$ ：磁場，單位：T
- $E$ ：電場，單位： $\text{V m}^{-1}$
- $A$ ：截面積或向量面積
- $\Phi_B$ ：磁通量
- $\mathcal{E}$ ：感應電動勢
- $n$ ：單位體積帶電粒子數密度 / 螺線管單位長度圈數（依情境）
- $N$ ：總圈數

## 易混淆觀念小提醒

- 感應電動勢  $\mathcal{E}$  與端電壓  $V$  :  $\mathcal{E}$  指閉合路徑上的總感應電動勢，端電壓  $V$  為元件兩端的電壓，兩者在電路分析中含義不同。
  - 線圈圈數  $n$  vs.  $N$  :  $n$  表示「單位長度」圈數 (如螺線管) ,  $N$  表示「總圈數」 (如電感、環形線圈)。
  - 電流方向與電子運動方向相反：計算時以「正電荷流動方向」為正。
  - 向量公式注意： $\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$  為向量叉積，方向由右手定則判斷。
- 

## 1 基本公式與定義

### 1.1 電流密度、導體

$$J = \frac{I}{A}$$

$$I = nqv_d A$$

(  $n$ : 單位體積內帶電粒子數量,  $v_d$ : 漂移速度 )

### 1.2 電阻

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$V = IR$$

### 1.3 歐姆定律

$$I = \frac{V}{R}$$

### 1.4 磁場與帶電粒子運動

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

$$r = \frac{mv}{qB}$$

圓周運動週期：

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

迴旋運動軌跡 pitch (螺旋線移動)：

$$\text{Pitch} = v_{\parallel} T = v_{\parallel} \cdot \frac{2\pi m}{qB}$$

## 1.5 磁場與安培定律

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_{\text{enc}}$$

## 1.6 磁場單位

$$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

## 1.7 通電直線、圓環、螺線管、環形線圈的磁場

- 直線電流：

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

- 圓形電流迴路中心：

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

- 長螺線管：

$$B = \mu_0 n I$$

$n$ : 單位長度圈數

- 環形 ( Toroid ):

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2\pi r}$$

$N$ : 線圈總圈數

## 1.8 電磁感應 ( 法拉第定律與楞次定律 )

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$U = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

楞次定律：感應電流方向總是反抗磁通量變化。

## 1.9 自感與電感 ( Inductor )

$$L = \frac{N\Phi_B}{I}$$

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$$

$$\mathcal{E}_L = -L \frac{dI}{dt}$$

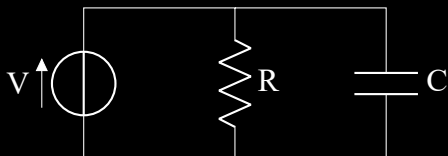
$$U_B = \frac{1}{2} L I^2$$

## 1.10 電容、儲存能量

$$Q = CV$$
$$U_C = \frac{1}{2}CV^2$$

## 2 電路：RL、RC、LC、RLC 電路

### 2.1 RC 電路



充電時：

$$q(t) = CV (1 - e^{-t/RC})$$

$$i(t) = \frac{V}{R} e^{-t/RC}$$

放電時：

$$q(t) = Q_0 e^{-t/RC}$$

$$i(t) = -\frac{Q_0}{RC} e^{-t/RC}$$

電容儲存能量：

$$U_C = \frac{1}{2}CV^2$$

### 2.2 RL 電路



通電時：

$$i(t) = \frac{V}{R} (1 - e^{-t/\tau}), \quad \tau = \frac{L}{R}$$

斷電時：

$$i(t) = I_0 e^{-t/\tau}$$

電感儲存能量：

$$U_L = \frac{1}{2}LI^2$$

## 2.3 LC 與 RLC 電路

$$LC: \quad Q = Q_0 \cos(\omega t + \phi), \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$RLC: \quad Q = Q_0 e^{-\gamma t} \cos(\omega' t + \phi)$$

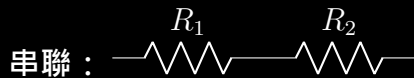
$$\gamma = \frac{R}{2L}$$

$$\omega' = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

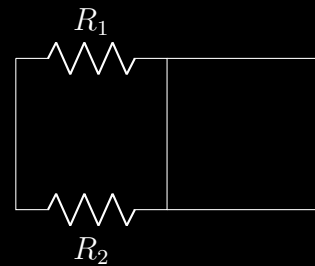
RLC 分類：

- 欠阻尼： $\omega' > 0$
- 臨界阻尼： $\omega' = 0$
- 過阻尼： $\omega' < 0$

### 串聯與並聯電阻示意



$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 + \dots$$



並聯：

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

## 3 交流電路與阻抗

### 3.1 交流電壓

$$V(t) = V_{\text{max}} \sin(\omega t)$$

### 3.2 電容元件

$$V_C = V_{\text{max}} \sin(\omega t)$$

$$q_C = CV_{\text{max}} \sin(\omega t)$$

$$i_C = \frac{dq}{dt} = \omega CV_{\text{max}} \cos(\omega t)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$I_{\text{max}} = \frac{V_{\text{max}}}{X_C}$$

### 3.3 電感元件

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$
$$X_L = \omega L$$
$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{X_L}$$

### 3.4 RLC 並聯

$$V_{\max}^2 = (I_{\max} R)^2 + (I_{\max} X_L - I_{\max} X_C)^2$$
$$X = \sqrt{X_L^2 + X_C^2}$$

### 3.5 相位關係

- $X_L > X_C$ : 電流落後電壓 (感性)
- $X_L = X_C$ : 電流與電壓同相 (共振)
- $X_L < X_C$ : 電流超前電壓 (容性)

## 4 靜電學與高斯定律

### 4.1 庫倫定律

$$F = k_e \frac{|q_1 q_2|}{r^2}, \quad k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.99 \times 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$$

### 4.2 電場與電勢

$$E = \frac{F}{q} = k_e \frac{|q|}{r^2}$$
$$V = k_e \frac{q}{r}$$
$$\vec{E} = -\nabla V$$
$$\Delta V = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$$

### 4.3 高斯定律

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{\text{enc}}}{\epsilon_0}$$

## 4.4 導體性質

- 導體內部無電場
- 導體表面電場垂直
- 導體表面為等位面

## 4.5 電容器

$$Q = CV, \quad C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

$$U = \frac{1}{2} CV^2$$

並聯電容：

$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 + \cdots$$

串聯電容：

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots$$

## 5 麥克斯威方程組

|               |  |
|---------------|--|
| (1) 高斯定律      | $\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$   |
| (2) 無磁單極      | $\nabla \cdot \vec{B} = 0$   |
| (3) 法拉第電磁感應   | $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$                                 |
| (4) 安培-馬克士威定律 | $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ |

## 常用向量微積分公式

- 散度定理 ( Gauss's Theorem )：

$$\int_V (\nabla \cdot \vec{A}) \, dV = \oint_{\partial V} \vec{A} \cdot d\vec{A}$$

- 斯托克斯定理 ( Stokes' Theorem )：

$$\int_S (\nabla \times \vec{A}) \cdot d\vec{A} = \oint_{\partial S} \vec{A} \cdot d\vec{\ell}$$