

第 0 章 3：基本物理概念

學電子硬體之前，需要先掌握幾個物理基礎。本章用最直白的方式整理。

一、原子與電子

原子模型

物質由原子 (atom) 組成。原子由：

- 原子核 (中央，包含質子 proton 與中子 neutron)
- 電子 (electron，環繞原子核)

組成。質子帶正電，電子帶負電，中子不帶電。

電子殼層

電子在原子核外按「殼層」 (shell) 排列：

殼層	最多電子數	對應軌道
K (n=1)	2	1s
L (n=2)	8	2s, 2p
M (n=3)	18	3s, 3p, 3d
N (n=4)	32	4s, 4p, 4d, 4f

最外層的電子稱為「價電子」 (valence electrons)，決定原子的化學與電性質。

為什麼這對電子學重要？

- 導體 (如銅) 的最外殼層電子鬆散，容易在原子間移動 → 導電
- 絕緣體 (如塑膠) 電子被緊緊束縛 → 不導電
- 半導體 (如矽 Si、鍺 Ge) 介於兩者之間 → 可控制其導電性

這個「可控制」是整個半導體產業的根基。

二、電荷與電場

電荷 (Charge)

電荷是物質的基本屬性，分為正電與負電。電荷的單位是「庫倫」(Coulomb, C)。

- 1 個電子的電荷量： $e = -1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
- 1 個質子的電荷量： $+1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

要產生 1 庫倫的電荷，需要約 6.24×10^{18} 個電子。

庫倫定律 (Coulomb's Law)

兩個電荷之間的作用力：

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

其中：- F ：作用力 (牛頓 N) - k ：庫倫常數 $\approx 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ - q_1, q_2 ：兩電荷 (C) - r ：距離 (m)

特性：- 同性相斥，異性相吸 - 力與距離平方成反比

電場 (Electric Field)

電場是空間中由電荷產生、能對其他電荷施力的「場」。

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

單位：N/C 或 V/m。

直覺：可以想像電場像「看不見的箭頭」佈滿空間，告訴正電荷該往哪方向受力。

為什麼這對電子學重要？

- 電容儲存電荷的本質就是儲存電場能量
- 絕緣體擊穿：電場太強時絕緣體會變導通（如靜電打火花）
- MOSFET 閘極控制：用閘極電場控制通道開關

三、電壓、電流、功率

這三個是電學最重要的物理量，初學者必須建立扎實理解。詳細的工程應用會在 [01-0000/01-0000.md](#) 再深入。

電壓 (Voltage)

電壓是「單位電荷的能量差」，也稱為「電位差」。

$$V = \frac{W}{Q}$$

單位：伏特 (Volt, V) = 焦耳/庫侖 = J/C

水流類比：- 電壓 $\approx$ 水壓（高低差）- 沒有水位差，水不會流 - 沒有電壓差，電流不會流

電流 (Current)

電流是「單位時間內通過某斷面的電荷量」。

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

單位：安培 (Ampere, A) = 庫侖/秒

水流類比：- 電流 $\approx$ 水管中水的流速

⚠ 注意：傳統電流方向是正電荷流動的方向（從正極到負極），與電子實際流動方向相反。這是歷史遺留約定。

功率 (Power)

功率是「單位時間消耗或產生的能量」。

$$P = V \times I$$

單位：瓦特 (Watt, W) = 焦耳/秒

直覺：- 1 W 燈泡 1 小時消耗 3600 J 能量 - 1 度電 = 1 kWh = 3.6×10^6 J

四、磁場與電磁感應

磁場 (Magnetic Field)

電流會產生磁場（安培定律）。磁場用「磁通密度 B」（單位：特斯拉 T）描述。

$\vec{B}$

(向量場)

右手定則：右手握住導線，拇指指向電流方向，四指彎曲方向就是磁場方向。

電磁感應 (Electromagnetic Induction)

法拉第發現：變化的磁場會產生電壓（電動勢）。

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

其中 $\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A}$ 是磁通量。

這是變壓器、發電機、電感、電動機所有電磁元件的基礎。

楞次定律 (Lenz' s Law)

感應電流的方向，必定是「反抗磁通變化」的方向。

直覺：- 磁鐵靠近線圈 → 線圈產生反向磁場想推開磁鐵 - 磁鐵遠離 → 線圈產生同向磁場想吸住磁鐵

這就是電感「抗拒電流變化」的物理本質。

馬克士威方程組 (Maxwell' s Equations)

電磁學的四個核心方程式（不需背公式，理解概念即可）：

1. 高斯定律：電場由電荷產生
2. 磁場高斯定律：沒有磁單極（磁場線必閉合）
3. 法拉第定律：變化磁場產生電場
4. 安培-馬克士威定律：電流和變化電場產生磁場

這四個方程式統一了電與磁，是 19 世紀最偉大的物理發現之一。所有電子學現象（包括電磁波、光、無線通訊）都源自此。

五、能帶理論（簡介）

學半導體前需要的核心概念，這裡先簡介，詳細在 [02-????](#) 展開。

為什麼有導體、絕緣體、半導體之分？

從量子力學：固體中的電子能量不是任意的，而是「能帶」（energy band）。

- 價帶（Valence Band）：價電子所在能帶
- 導帶（Conduction Band）：自由電子所在能帶
- 能隙（Band Gap, E_g ）：兩者之間的禁帶

三類材料

材料	能隙大小	行為
導體	沒有能隙（價帶與導帶重疊）	電子可自由移動
絕緣體	大 ($>4\text{ eV}$)	電子無法跨越
半導體	中等 ($0.5\text{--}3\text{ eV}$)	可被外加能量激發

常見半導體能隙：- 矽 Si：1.12 eV - 鍺 Ge：0.66 eV - 砷化鎵 GaAs：1.43 eV - 碳化矽 SiC：3.26 eV - 氮化鎵 GaN：3.4 eV

這些數字決定了元件的工作溫度、開關速度、耐壓等特性。

六、單位制與量綱

SI 國際單位系統

電子學常用 SI 單位：

物理量	單位	符號
長度	米	m
時間	秒	s
電流	安培	A
電壓	伏特	V
電阻	歐姆	Ω
電容	法拉	F
電感	亨利	H
頻率	赫茲	Hz
功率	瓦特	W
能量	焦耳	J
電荷	庫侖	C
磁通密度	特斯拉	T
磁通量	韋伯	Wb

量綱分析

寫公式時可以用「量綱」檢查正確性：

例如：時間常數 $\tau = RC$

- R 單位： $\Omega = V/A$
- C 單位： $F = C/V = A \cdot s/V$
- $\tau = (V/A) \times (A \cdot s/V) = s$ (秒) ✓

如果計算後單位不對，公式一定錯了。這是除錯神器。

工程記號 (Engineering Notation)

以 3 為單位的次方，方便對應 SI 前綴：

- $1.5 \times 10^3 = 1.5k$
- $4.7 \times 10^{-6} = 4.7\mu$
- $220 \times 10^{-12} = 220p$

別寫 $4.7 \times 10^{-5} \text{ F}$ ，要寫 $47 \mu\text{F}$ 或 $4.7\text{e-}5$ 。業界 datasheet 大都用工程記號。

七、常用數學工具

1. 微積分 (Calculus)

電子學基本上離不開：

- 微分：描述「變化率」
- 電流 $i = dq/dt$
- 電容電壓 $v = (1/C) \int i \, dt$ 或反過來 $i = C \, dv/dt$
- 電感電壓 $v = L \, di/dt$
- 積分：描述「累積量」
- 能量 $= \int P \, dt$
- 電荷 $= \int i \, dt$

如果微積分還不熟，建議快速複習基本概念。

2. 複數 (Complex Numbers)

交流電路分析必用：

$$j = \sqrt{-1}$$

電子學用 j 而不是 i （因為 i 已用於電流）。

阻抗的概念：

$$Z_R = R$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

$$Z_L = j\omega L$$

$\omega = 2\pi f$ 是角頻率 (rad/s)。

3. 三角函數與相量 (Phasor)

正弦訊號 $v(t) = V_m \sin(\omega t + \varphi)$ 可用相量表示：

$$\tilde{V} = V_m \angle \varphi$$

把時域問題轉成代數運算，大幅簡化交流電路計算。

4. 對數 (Logarithm)

電子學常用對數：

- 分貝 (dB)：
- 功率： $P_{dB} = 10 \log_{10}(P/P_{ref})$
- 電壓： $V_{dB} = 20 \log_{10}(V/V_{ref})$
- dBm：以 1 mW 為參考
- dBV：以 1 V 為參考
- 頻率對數座標：bode 圖用 log 頻率軸

5. 傅立葉分析 (Fourier Analysis)

任何週期訊號可分解成正弦波的疊加。這是訊號處理、濾波器設計的核心。

不需現在就精通，但要知道存在這個工具。

八、靜電學的實務影響

ESD (靜電放電)

人體日常活動會累積靜電：

- 走在地毯上：可達 35,000 V
- 撕開塑膠袋：6,000 V
- 摸 IC 之前最好接地： < 100 V

一顆 CMOS IC 的閘極氧化層只能耐 ~ 50 V，靜電放電一下就燒。

防護措施

- ESD 手環：手腕戴防靜電手環，連接接地
- ESD 桌墊：工作台鋪導電膠墊
- ESD 包裝：IC 用導電海綿、防靜電袋
- 保護電路：IC 內部會有 ESD 保護二極體

九、能量守恆與工程取捨

能量守恆

電子電路也要守能量守恆：

進來的能量 = 輸出能量 + 損耗能量（熱）

任何放大器的「放大」是用直流電源的能量去放大訊號，不是憑空變大。

工程取捨 (Trade-offs)

電子設計沒有「完美方案」，永遠是取捨：

想要A	通常會犧牲 B
高效率	高成本（更好元件）
低雜訊	高功耗
高頻寬	低增益
小型化	散熱困難
低功耗	慢速

理解取捨，才能做出適合需求的設計。

十、本章總結

✅ 您現在應該理解：

1. 原子與電子的基本結構，導體/絕緣體/半導體的差別
2. 電壓、電流、功率的物理意義（不只記公式，而是理解）
3. 電場、磁場是空間中的「場」，電磁感應的基礎
4. 半導體之所以有用，是因為「能帶可控」
5. SI 單位制與工程記號
6. 必備數學工具：微積分、複數、相量、分貝、傅立葉
7. ESD 是實務操作必須注意的事

如果某個概念不清楚，請查閱大學物理或電磁學教科書補強，再進入下一章。

下一步

進入 `../01-??/?/01-?????.md`，正式開始電子學基礎。

💡 學習提示：物理直覺比公式重要。看到任何電子現象時，先問：「能量從哪來？往哪去？」
「電荷如何流動？」「能帶/載子如何分佈？」這些問題的答案就是物理本質。