

第 1 章 11：基本電路定律

本章整理電路分析的「核心定律」與「重要定理」，是進入中級電路設計的必備工具。

一、克希荷夫定律 (Kirchhoff's Laws)

KCL (電流定律 Kirchhoff's Current Law)

任何節點的電流代數和為零：

$$\sum_k I_k = 0$$

或更直觀：

$$\sum I_{\text{out}} = \sum I_{\text{in}}$$

物理本質：電荷守恒（節點不會「儲存」電荷）。

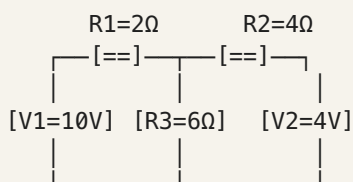
KVL (電壓定律 Kirchhoff's Voltage Law)

沿任何封閉迴路的電壓代數和為零：

$$\sum_k V_k = 0$$

物理本質：能量守恒（沿封閉路徑回到同一點，電位差為零）。

KCL/KVL 應用範例



用 mesh analysis (迴路法)：

設左迴路電流 I_1 (順時針)，右迴路電流 I_2 (順時針)。

左迴路 KVL：

$$10 - 2I_1 - 6(I_1 - I_2) = 0$$

$$8I_1 - 6I_2 = 10 \quad \cdots(1)$$

右迴路 KVL：

$$-6(I_2 - I_1) - 4I_2 - 4 = 0$$

$$6I_1 - 10I_2 = 4 \quad \cdots(2)$$

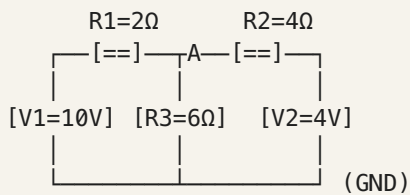
解：- 從(1)： $8I_1 - 6I_2 = 10$ - 從(2)： $6I_1 - 10I_2 = 4$

$(1) \times 3 - (2) \times 4$ ： $24I_1 - 18I_2 - 24I_1 + 40I_2 = 30 - 16 \rightarrow 22I_2 = 14 \rightarrow I_2 \approx 0.636 \text{ A}$

代回(1)： $8I_1 = 10 + 6 \times 0.636 = 13.82 \rightarrow I_1 \approx 1.728 \text{ A}$

二、節點分析法 (Node Analysis)

選一個節點為參考（接地），對其他節點寫 KCL：



設節點 A 電壓 V_A ：

KCL @ A：

$$\frac{V_A - 10}{2} + \frac{V_A}{6} + \frac{V_A - 4}{4} = 0$$

通分（分母 12）：

$$6(V_A - 10) + 2V_A + 3(V_A - 4) = 0$$

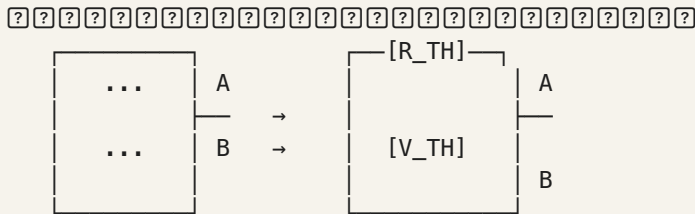
$$11V_A = 60 + 12 = 72$$

$$V_A \approx 6.55 \text{ V}$$

節點分析常常比迴路分析快，特別是節點少的電路。

三、戴維寧定理 (Thévenin' s Theorem)

任何線性電路（含獨立源、相依源）對外可等效為一個電壓源 V_{TH} 串聯一個電阻 R_{TH} 。



求 V_{TH} （開路電壓）

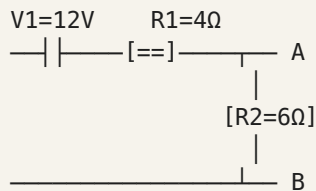
把外部負載斷開，量 A-B 之間的開路電壓 = V_{TH} 。

求 R_{TH} （戴維寧電阻）

方法 1：把所有獨立源「殺掉」（電壓源短路、電流源開路），從 A-B 看入的電阻 = R_{TH} 。

方法 2：求短路電流 I_{SC} ，則 $R_{TH} = V_{TH} / I_{SC}$ 。

範例



V_{TH} (A-B 開路)：

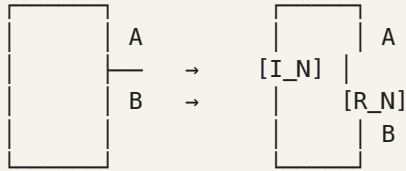
無電流通過 $R1$ ， $V_{AB} = R2$ 兩端電壓 = $12 \times 6 / (4+6) = 7.2 \text{ V} \rightarrow V_{TH} = 7.2 \text{ V}$

R_{TH} ($V1$ 短路)：

$R1$ 與 $R2$ 並聯： $4 \times 6 / (4+6) = 2.4 \text{ } \Omega \rightarrow R_{TH} = 2.4 \text{ } \Omega$

四、諾頓定理 (Norton' s Theorem)

任何線性電路對外可等效為一個電流源 I_N 並聯一個電阻 R_N 。



關係： $-I_N = V_{TH} / R_{TH} - R_N = R_{TH}$

戴維寧 $\leftrightarrow$ 諾頓 互相轉換。

五、重疊定理 (Superposition Theorem)

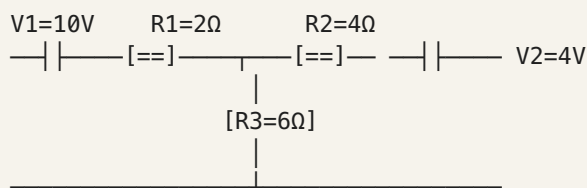
線性電路中，多個獨立源的響應 = 各源單獨作用響應的總和。

只能用於線性元件（電阻、電容、電感、線性 controlled source）。不適用於非線性（二極體、電晶體大信號）。

步驟

1. 對每個獨立源逐個保留，其他殺掉（V $\rightarrow$ 短路, I $\rightarrow$ 開路）
2. 計算該源單獨作用下的響應
3. 全部加總

範例



V1 單獨作用 (V2 短路)：

$R2 \parallel R3 = 24/10 = 2.4 \, \Omega$ 總電阻 = $R1 + 2.4 = 4.4 \, \Omega$ $I_{R1} = 10/4.4 = 2.27 \, A$ $V_{A1} = I_{R1} \times 2.4 = 5.45 \, V$

V2 單獨作用 (V1 短路)：

$R1 \parallel R3 = 12/8 = 1.5 \, \Omega$ 總電阻 = $R2 + 1.5 = 5.5 \, \Omega$ $I_{R2} = 4/5.5 = 0.727 \, A$ $V_{A2} = I_{R2} \times 1.5 = 1.09 \, V$

總和： $V_A = V_{A1} + V_{A2} = 5.45 + 1.09 = 6.54 \, V$ ✓ 與前面節點分析結果相符

六、最大功率傳輸定理

負載 R_L 上消耗最大功率時， $R_L = R_{TH}$ （戴維寧電阻）。

最大功率：

$$P_{max} = \frac{V_{TH}^2}{4R_{TH}}$$

效率僅 50%（ V_{TH} 一半在 R_{TH} 上消耗）。

注意：這只在 訊號傳輸（如音響、射頻）時用，電源供電 反而要 $R_L \gg R_{TH}$ 提高效率。

七、戴維寧/諾頓的實務意義

任何複雜電路從一對端點看出去，都可以用一個電壓源（或電流源）+ 電阻代表。

這就是為什麼「電源輸出電阻」、「輸入阻抗」這些概念這麼重要： - 電池：理想電壓源 + 內阻 - LDO 輸出：戴維寧等效 - BJT 集極：諾頓等效（高阻抗電流源）

八、電容、電感的暫態分析

一階電路：RC、RL

時間常數：- RC： $\tau = R \times C$ - RL： $\tau = L / R$

充電（從 $V_{initial}$ 到 V_{final} ）：

$$v(t) = V_{final} + (V_{initial} - V_{final})e^{-t/\tau}$$

放電（從 $V_{initial}$ 到 0）：

$$v(t) = V_{initial} \cdot e^{-t/\tau}$$

二階電路：RLC

特徵方程式：

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = 0$$

→ 解的形式： $e^{(s \cdot t)}$ ，其中 s 是特徵根：

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

三種響應類型

定義阻尼比 ζ (zeta)：

$$\zeta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

ζ	類型	行為
$\zeta > 1$	過阻尼 (Overdamped)	緩慢回到穩態，無震盪
$\zeta = 1$	臨界阻尼 (Critically Damped)	最快達到穩態
$\zeta < 1$	欠阻尼 (Underdamped)	震盪後達到穩態
$\zeta = 0$	無阻尼 (Undamped)	永久震盪 (純 LC)

控制系統設計常追求 $\zeta \approx 0.7$ (小過衝、快速)。

九、相量分析 (AC 穩態)

正弦穩態下用相量分析最方便。

阻抗

元件	阻抗
電阻 R	$Z_R = R$
電容 C	$Z_C = 1/(j\omega C) = -j/(\omega C)$
電感 L	$Z_L = j\omega L$

範例：RLC 串聯諧振

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

當虛部為零時：

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

這就是「諧振頻率」。

品質因數 (Quality Factor)

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Q 越大，諧振峰越尖銳（選頻能力越強）。

十、Bode 圖與頻率響應

轉移函數 $H(j\omega)$

$$H(j\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

兩個重要量： - 大小 (Magnitude)： $|H(j\omega)|$ ，常用 dB 表示： $20 \log_{10} |H|$ - 相位 (Phase)： $\angle H(j\omega)$ ，弧度或度

Bode 圖規則

- X 軸： $\log(\omega)$
- Y 軸（大小）：dB
- Y 軸（相位）：度

一階低通範例 (RC 濾波)

$$H = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

- 截止頻率 (-3dB)： $f_c = 1/(2\pi RC)$
- 低於 f_c ：增益 = 1 (0 dB)
- 高於 f_c ：每十倍頻率衰減 20 dB

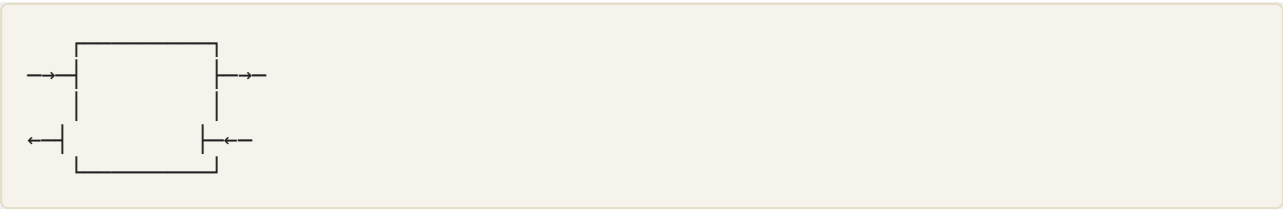
一階高通

$$H = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

低於 f_c 衰減，高於 f_c 通過。

十一、二端口網路

複雜電路可看作「二端口」：



四個基本參數系列：- z 參數（阻抗矩陣）- y 參數（導納矩陣）- h 參數（混合，BJT 常用）- S 參數（散射，射頻必用）

不需現在精通，但要知道存在。

十二、常見電路定理彙整

定理	適用	用途
KCL/KVL	任何電路	基本分析
節點/迴路法	任何電路	系統化解題
戴維寧 / 諾頓	線性電路	簡化等效
重疊定理	線性電路	多源簡化
替代定理	任何	已知量替代
互易定理	線性無源	對稱性
最大功率傳輸	戴維寧後	阻抗匹配
米勒定理	含 controlled source	簡化高頻分析

十三、實務技巧

1. 「先粗估，再精算」

設計前用 estimation：- 戴維寧化看大概電壓電流 - 假設理想元件 - 一位有效數字計算

精度需求高時再用 SPICE 模擬。

2. 「拆解大電路」

大電路 → 拆成幾個功能塊：- 電源 - 訊號路徑 - 反饋 - 保護
各自分析後再合併。

3. 「直流分析 + AC 分析」分開

- DC：求工作點（IC 偏壓）
- AC：求小信號響應、增益、頻寬

兩者不互相影響（線性近似下）。

4. 「用 SPICE 驗證」

LTspice、ngspice 免費，可驗證手算結果，避免低級錯誤。

十四、本章總結

✔ 您應該掌握：

- [x] KCL、KVL 的物理意義與應用
- [x] 節點分析、迴路分析
- [x] 戴維寧、諾頓定理
- [x] 重疊定理（線性電路）
- [x] 最大功率傳輸
- [x] RC、RL 暫態，時間常數
- [x] RLC 二階電路與阻尼類型
- [x] 相量分析、阻抗、諧振
- [x] Bode 圖基本概念

自我檢測

1. 戴維寧定理求 R_{TH} 時為何要把獨立源殺掉？
2. $RC = 100 \mu s$ 的電路， 5τ 是多久？此時電壓接近最終值多少 %？
3. RLC 中要避免「永久震盪」，需要什麼條件？
4. $100 \text{ nF} + 100 \mu H$ 諧振頻率多少？
5. 一階 RC 低通在截止頻率時的增益（dB）多少？

解答

1. R_{TH} 是「網路本身的阻抗」，與源無關。殺掉獨立源後從端點看入的電阻就是 R_{TH}
 2. $5\tau = 500\ \mu\text{s}$ ；達到 99.3%（視為穩態）
 3. $R > 0$ （有阻尼），即電路必須消耗能量
 4. $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC}) = 1/(2\pi \times \sqrt{(10^{-7} \times 10^{-4})}) \approx 50.3\ \text{kHz}$
 5. -3 dB（即 $1/\sqrt{2} \approx 0.707$ ）
-

基礎篇結束

恭喜！您完成了基礎篇。接下來建議：

- 不熟悉的章節再複習一次
- 試做幾個 LTspice 模擬驗證概念
- 進入 [../02-????/01-?????.md](#) 深入半導體
- 或前往 [../08-????/01-????-LED?.md](#) 動手做