

第 1 章 2：電阻 (Resistor)

電阻是電子電路中最常見、看似簡單其實學問很多的元件。

一、什麼是電阻？

物理本質

電阻是「對電流通過的阻礙」，使電能轉換為熱能（焦耳熱）。

電子在金屬或電阻材料中流動時，會與晶格原子、雜質、缺陷碰撞，這些散射造成能量損耗。

電路符號

- IEC（歐式）：長方形 □
- ANSI（美式）：鋸齒線 ⌞

IEC:	—[==]—
ANSI:	—/\ /\ /\—

兩種都常見，看 datasheet 與電路圖時要認得。

單位

歐姆 (Ω) = V / A

常見阻值範圍： $m\Omega \sim T\Omega$ 。

二、電阻的功能應用

電阻在電路中的角色非常多元：

功能	應用場合
限流	LED 串聯保護、訊號保護
分壓	ADC 量測高電壓、提供偏壓
下拉/上拉 (Pull-up/Pull-down)	數位輸入預設電位
回授	運算放大器增益設定
匹配阻抗	高速訊號終端 $50\Omega/100\Omega$
電流取樣 (Sense)	量測大電流 ($m\Omega$ 級分流電阻)
發熱	電熱絲、加熱器
負載	電源測試假負載
去耦	串聯 RC 濾波
保險功能	熔斷型電阻 (Fusible Resistor)

三、電阻種類

1. 依製作技術分類

A. 碳膜電阻 (Carbon Film)

- 在陶瓷基板上鍍碳膜
- 便宜、雜訊較大
- 精度 $\pm 5\%$
- 已逐漸被金屬膜取代

B. 金屬膜電阻 (Metal Film)

- 鎳鉻或鈮氮化物等金屬膜
- 精度高 ($\pm 1\%$ 常見)
- 溫度係數低
- 通孔電阻最常用

C. 厚膜電阻 (Thick Film)

- 印刷貼片技術
- 大多數 SMD 電阻屬此類

- 成本低、適合大量生產
- 精度通常 $\pm 1\%$ 至 $\pm 5\%$

D. 薄膜電阻 (Thin Film)

- 蒸鍍金屬薄膜
- 精度極高 ($\pm 0.01\%$ 到 $\pm 0.5\%$)
- 溫度係數低 ($< 25 \text{ ppm}/^\circ \text{C}$)
- 用於精密電路

E. 線繞電阻 (Wirewound)

- 電阻線 (鎳鉻合金) 繞在陶瓷棒上
- 高精度、大功率
- 但有寄生電感 (不適合高頻)

F. 金屬箔電阻 (Metal Foil)

- Vishay 等公司的高精度產品
- 精度可達 $\pm 0.005\%$
- 溫度係數可達 $0.05 \text{ ppm}/^\circ \text{C}$
- 用於最精密儀器

2. 依封裝分類

通孔 (Through Hole, THT)

- 碳膜/金屬膜：軸向引線 (axial)，最常見
- 大功率水泥電阻：陶瓷外殼包裹
- 方形繞線電阻：散熱片狀

表面貼裝 (Surface Mount, SMD)

規格代碼	尺寸 (in)	尺寸 (mm)	功率
0201	0.020×0.010	0.6×0.3	1/20 W
0402	0.040×0.020	1.0×0.5	1/16 W
0603	0.060×0.030	1.6×0.8	1/10 W
0805	0.080×0.050	2.0×1.25	1/8 W
1206	0.120×0.060	3.2×1.6	1/4 W
1210	0.120×0.100	3.2×2.5	1/2 W
2010	0.200×0.100	5.0×2.5	3/4 W
2512	0.250×0.120	6.4×3.2	1 W

業界趨勢：尺寸越做越小（已有 01005、008004 等超微型）。0603 是現代最常見的「平衡點」，0402 在高密度設計常用。

3. 特殊電阻

熱敏電阻 (Thermistor)

- NTC（負溫度係數）：溫度上升，阻值下降。用於溫度量測、突波抑制
- PTC（正溫度係數）：溫度上升，阻值上升。用於過流保護（自恢復保險絲）

光敏電阻 (LDR / Photoresistor)

- 光照強度增加，阻值下降
- 用於簡單光照偵測

壓敏電阻 (Varistor / MOV)

- 電壓低時阻值高，電壓超過閾值阻值急降
- 用於突波保護（雷擊、電源浪湧）

可變電阻 / 電位計 (Potentiometer / Trimmer)

- 三端元件，可調整阻值
- 用於音量調整、微調

數位電位計 (Digital Potentiometer)

- 用 SPI/I²C 控制阻值
- 用於程式可控的調整

四、電阻的關鍵規格

選用電阻時要看 datasheet 的這些參數：

1. 阻值 (Resistance Value)

電阻的標稱值。常見有 E 系列標準值：

- E12 (±10%) : 1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.2, 2.7, 3.3, 3.9, 4.7, 5.6, 6.8, 8.2
- E24 (±5%) : 在 E12 之間插入 1.1, 1.3, 1.6, 2.0, 2.4, 3.0, 3.6, 4.3, 5.1, 6.2, 7.5, 9.1
- E48 (±2%) 、E96 (±1%) 、E192 (±0.5%)

這些「標準值」是業界決定的庫存值。設計時盡量用這些，採購容易。

2. 容差 (Tolerance)

實際值偏離標稱值的最大百分比：

容差	標示	用途
±0.1%	F	精密儀器、計量
±0.5%	D	高精度
±1%	F (也用)	一般精密
±2%	G	
±5%	J	一般用
±10%	K	上下拉、限流 (粗略用途)

提示：容差不是越小越好。±1% 已能滿足絕大多數設計，過度追求精度會增加成本。

3. 額定功率 (Power Rating, P_{max})

電阻能承受的最大連續耗散功率。

設計準則：降額使用 (Derating)，實際使用 < 50% 額定，以延長壽命、降低溫升。

4. 額定電壓 (Working Voltage)

長期可承受的最大電壓。小尺寸 SMD 電阻電壓額定可能很低 (如 0402 為 50V)。

5. 溫度係數 (TCR, Temperature Coefficient of Resistance)

阻值隨溫度變化的速率，單位 ppm/°C：

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

等級	TCR	應用
一般金屬膜	±100 ppm/°C	一般電路
精密金屬膜	±50 ppm/°C	較精密
高精度	±25 ppm/°C	量測
超高精度	±5 ppm/°C 以下	精密儀器

例：100Ω ±100ppm/°C 電阻在 25°C → 75°C 變化： $\Delta R = 100 \times 100 \times 10^{-6} \times 50 = 0.5 \Omega \rightarrow$ 變化 0.5%

6. 雜訊 (Noise)

電阻會產生雜訊：

- 熱雜訊 (Johnson-Nyquist Noise)：

$$V_n = \sqrt{4k_B T R \Delta f}$$

- k_B ：波茲曼常數 1.38×10^{-23} J/K
- T ：絕對溫度 (K)
- R ：電阻 (Ω)
- Δf ：頻寬 (Hz)

例：1 kΩ 在室溫 (300K) 1 Hz 頻寬： $V_n \approx 4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

- 過剩雜訊 (Excess Noise / 1/f Noise)：碳膜 > 厚膜 > 薄膜 > 金屬箔

低雜訊放大器 (如音響前級、感測器前端) 必須選低雜訊電阻。

7. 寄生效應

理想電阻只是純電阻，但真實電阻有：

- 寄生電感：尤其是線繞電阻（μH 等級）
- 寄生電容：兩端引線間的電容（pF 等級）

高頻時電阻不再是純電阻：

$$Z_R(\omega) = \frac{R(1 + j\omega L/R)}{1 + j\omega RC + j\omega L/R - \omega^2 LC}$$

→ 高頻電路要選低電感電阻（薄膜或厚膜）。

五、阻值標示方式

1. 色環電阻（通孔）

四環電阻：

[?]1[?][?]2[?][?][?][?]

顏色	數字	乘數	容差
黑	0	× 1	—
棕	1	× 10	±1%
紅	2	× 100	±2%
橙	3	× 1k	—
黃	4	× 10k	—
綠	5	× 100k	±0.5%
藍	6	× 1M	±0.25%
紫	7	× 10M	±0.1%
灰	8	—	±0.05%
白	9	—	—
金	—	× 0.1	±5%
銀	—	× 0.01	±10%

例：紅紫橙金 = $2.7 \times 1k, \pm 5\% = 27 k\Omega \pm 5\%$

五環/六環電阻精度更高（增加一位有效數字、TCR 環）。

2. SMD 電阻數字標示

三位數字

前兩位是有效數字，第三位是 10 的次方數。

- $100 = 10 \times 10^0 = 10 \Omega$
- $472 = 47 \times 10^2 = 4.7 k\Omega$
- $105 = 10 \times 10^5 = 1 M\Omega$
- $0R0 / 000 = 0 \Omega$ （短路用跳線）

四位數字（精密電阻）

前三位有效數字，第四位次方數。

- $4701 = 470 \times 10^1 = 4.7 k\Omega$
- $1002 = 100 \times 10^2 = 10 k\Omega$

EIA-96 編碼

精密 SMD 電阻常用，三字母碼：兩位數字 + 一位字母。

如：「01A」 = $100 \times 1 = 100 \Omega$ 「01C」 = $100 \times 100 = 10 k\Omega$

3. 文字標示（歐式）

用字母代替小數點：

- $4R7 = 4.7 \Omega$
- $4k7 = 4.7 k\Omega$
- $4M7 = 4.7 M\Omega$
- $470R = 470 \Omega$

這種寫法 datasheet 常見，避免印刷或閱讀時遺漏小數點。

六、電阻的選用流程

步驟 1：確定阻值

依電路功能計算所需阻值。

步驟 2：估算功率

$$P = I^2 R = \frac{V^2}{R}$$

選用 $P_{\text{額定}} \geq 2 \times P_{\text{實際}}$ 。

步驟 3：選封裝

- 通孔：原型製作、高功率、學生實驗
- SMD：量產主流 (0402/0603/0805 為主)

步驟 4：選精度

- 上下拉、限流：±5% 即可
- 分壓、回授：±1%
- 量測、精密：±0.1% 以上

步驟 5：考慮溫度係數

- 室內固定環境：±100 ppm/° C 即可
- 戶外、汽車：±25–50 ppm/° C
- 量測儀器：±10 ppm/° C 以下

步驟 6：考慮雜訊（如需要）

低雜訊應用 → 選薄膜或金屬箔。

步驟 7：考慮寄生效應（高頻時）

- 100 MHz 應用：選低電感的厚膜或薄膜
- 避免線繞電阻

步驟 8：選製造商

主流大廠：

- Yageo 國巨（台灣，全球第一大）
- Panasonic
- Vishay（美，含 Dale 系列）
- Rohm
- Susumu（日，精密用）
- Bourns（含 Trimmer）
- TE Connectivity

七、實際應用範例

例 1：LED 限流電阻

5V 電源驅動紅色 LED ($V_F = 2V, I_F = 10\text{ mA}$)：

$$R = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F} = \frac{5 - 2}{0.01} = 300\Omega$$

選 E12 標準值：330 Ω

功率： $P = (3V)^2 / 330 \approx 27\text{ mW} \rightarrow 0603$ (1/10W) 足夠

例 2：MCU GPIO 上拉

3.3V 系統，GPIO 內阻無法忽略，選擇 10 k Ω 上拉電阻：

- 平時無電流（高阻態），耗能小
- 拉低時電流： $3.3V / 10k\Omega = 330\text{ }\mu\text{A}$ （低）
- 對快速訊號可能 RC 過大 ($C \sim 10\text{ pF} \rightarrow \tau = 100\text{ ns}$)

經驗：低速數位用 10k–100k；高速數位用 1k–10k；I²C 上拉常用 4.7k 或 2.2k。

例 3：分壓電路（電池電壓量測）

12V 電池接 ADC（最大 3.3V）：

需要分壓比 $\sim 3.3/12 \approx 0.275$

選 $R_1 = 100k, R_2 = 36k$ ：

$$V_{out} = 12 \times \frac{36}{100+36} \approx 3.176V$$

注意：- 取較大電阻減少分壓電流（消耗）- 但太大會被 ADC 輸入阻抗影響 - 建議分壓阻抗 < 10 k Ω （依 ADC 而定）

例 4：電流量測 (Shunt Resistor)

要量 5A 電流，使用 0.01 Ω (10 m Ω) shunt 電阻：

電壓 = 5 A $\times$ 0.01 Ω = 50 mV

功率 = I^2R = 25 $\times$ 0.01 = 0.25 W $\rightarrow$ 至少選 1W 額定

電流取樣電阻通常用 4 端子 (Kelvin connection) 以避免接觸電阻誤差。

八、實務上的常見錯誤

1. 功率算錯

最常見：忽略電阻會發熱。範例：12V 跨 100 Ω $\rightarrow$ 1.44W $\rightarrow$ 0805 (1/8W) 會燒。

2. 上下拉太小或太大

- 太大：抗雜訊能力差、邊緣慢
- 太小：耗能高、可能拉不動下游

3. 分壓電阻太大

ADC 輸入需要驅動，太高分壓阻抗會降低取樣精度。

4. 高頻用了線繞

線繞電阻在 MHz 以上行為像電感，訊號會嚴重失真。

5. 忽略容差累積

R1/R2 分壓比受兩電阻容差影響，最壞情況可能 $\pm 2\%$ 。

6. 0 Ω 電阻誤解

0 Ω 不是「0 電阻」，是約幾 m Ω 的低阻電阻，但常用於：- 跳線 (PCB 設計時的選項) - 電氣隔離 (如多種地的單點連接) - EMI 抑制 (與 ferrite bead 搭配)

7. ESR 與容差混淆

精密電阻不僅是容差小，TCR 與長期穩定性 (ageing) 也要考慮。

九、本章總結

✔ 您現在應該理解：

- [x] 電阻的物理本質與功能
- [x] 各種電阻類型（碳膜、金屬膜、薄膜、厚膜、線繞、特殊）
- [x] SMD 與通孔封裝規格
- [x] datasheet 關鍵參數（阻值、容差、功率、溫度係數、雜訊、寄生）
- [x] 色環與 SMD 數字標示
- [x] 實際選用流程
- [x] 常見應用：限流、分壓、上下拉、電流量測

自我檢測

1. SMD 電阻 0805 標示「472」，阻值多少？
2. 5V 驅動 $1.5\text{k}\Omega$ 電阻，電流、功率多少？需要多大封裝？
3. $1\text{k} \pm 5\%$ 與 $1\text{k} \pm 1\%$ 在分壓電路中誤差差多少？
4. 為什麼 I²C 上拉電阻不能太大？
5. 線繞電阻為什麼不適合高頻？

解答

1. $472 = 47 \times 10^2 = 4700\ \Omega = 4.7\text{ k}\Omega$
2. $I = 5/1500 \approx 3.33\text{ mA}$; $P = V^2/R = 25/1500 \approx 16.7\text{ mW}$; 0402 (1/16 W) 勉強，0603 (1/10 W) 保險
3. 分壓誤差大約是兩電阻容差和： $\pm 10\%$ vs $\pm 2\%$ （粗略）
4. 太大時上拉時間常數變長（線路電容 $\sim \text{pF}$ ），高頻訊號邊緣變慢，I²C 速度受限
5. 線繞有寄生電感（ μH 級），高頻時電阻特性退化，相位偏移

下一章

03-[\[?\]\[?\].md](#) 一 電容深入：原理、種類、選用、頻率特性。