



台科大圖書

since 1997

AC10122

技術型高級中等學校 | 電機與電子群

基本電學

上

Basic Electricity



Basic Electricity

CHAPTER 2

電阻

2-1 電阻及電導

2-2 各種電阻器

2-3 歐姆定律

2-4 電阻溫度係數

2-5 焦耳定律

2-1 電阻及電導

- 2-1.1 電阻及電阻係數
- 1. 電阻的定義及功能
- 從1-5 節「電壓」的定義中可得知：導體中電荷受到電動勢的驅使而移動形成電流；電荷在移動的過程中，會因為互相碰撞產生熱量，而消耗電能減少電流量；因此定義：電荷在物體中移動時所遭受到的阻力稱為電阻（**resistance**），以 R 為代號，其單位為歐姆（**Ohm**），以希臘字母「 Ω 」表示；圖2-1為 8Ω 電阻器的電路符號。



圖 2-1 8Ω 電阻器的電路符號

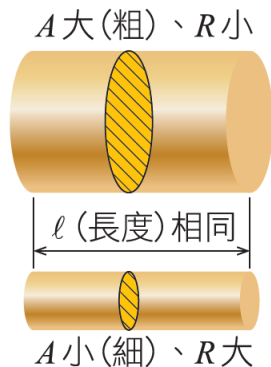
2-1 電阻及電導

- 物質大多有電阻存在，物質的電阻愈大時，電荷移動所受的阻力愈大，電流愈小，亦即電阻具有限制電路電流的作用；藉由調整電路中電阻的大小，可以取得所需的端電壓；相關運算詳見後續章節。
- 2. 電阻值的計算
- 我們知道：當水管的管徑（截面積）愈粗或長度愈短，水愈容易流通，意即水流的阻力和水管的截面積成反比，而與水管的長度成正比。電導體和水管有相同的性質，根據實驗結果發現，影響物體電阻大小的因素有下列三個：

2-1 電阻及電導

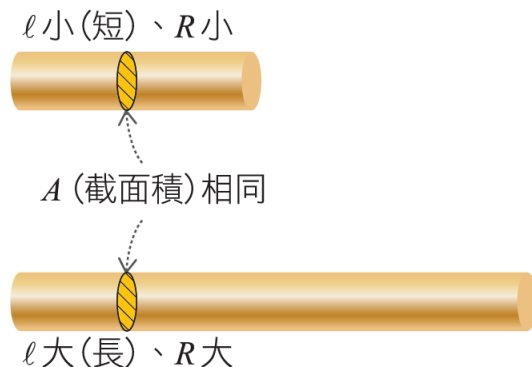
1. 截面積 (A)

電流垂直穿過的物體截面積； R 與 A 成反比。換言之，物體愈粗者，其電阻值愈小、電荷愈容易流動。



2. 長度 (l)

電流流過物體的實際總長； R 與 l 成正比。換言之，物體長度愈短者，其電阻值愈小、電荷愈容易流動。



3. 電阻係數 (resistivity, ρ)

用來表示該材料阻止電荷流通的能力；導電性愈好的材料，其電阻係數愈小；表 2-1 為各種材料的電阻係數，其單位為 $\Omega \cdot \text{m}$ (歐姆·公尺)。

➤ 結論

粗短：電阻 小。

細長：電阻 大。

2-1 電阻及電導

表 2-1 常用材料的電阻係數（在 20°C 時）

材料種類		電阻係數 ρ ($\Omega \cdot m$)	材料種類		電阻係數 ρ ($\Omega \cdot m$)
1	銀	1.64×10^{-8}	8	矽鋼	62.5×10^{-8}
2	標準韌銅	1.724×10^{-8}	9	鎳鉻合金	150×10^{-8}
3	硬抽銅	1.77×10^{-8}	10	碳	3500×10^{-8}
4	金	2.44×10^{-8}	11	矽	640
5	鋁	2.83×10^{-8}	12	雲母	5×10^{11}
6	鎢	5.6×10^{-8}	13	玻璃	10^{12}
7	鐵	10×10^{-8}	14	石英	75×10^{16}

電阻係數愈小者，
表示導電性愈好

電阻係數愈大者，
表示導電性愈差

註 (1) 1 ~ 10 項為導體，11 為半導體，12 ~ 14 為絕緣體。電阻係數為 0 的導體稱為超導體。

(2) 同一材料的物體於不同溫度下，亦將有不同的電阻值，說明詳見 2-4 節所述。

2-1 電阻及電導

$$R \text{ (電阻)} = \rho \text{ (電阻係數)} \times \frac{\ell \text{ (長度)}}{A \text{ (截面積)}} \quad (\text{歐姆}, \Omega)$$

公式
2-1

◆ 表 2-2 電阻值算式相關單位

單位 \ 名稱	電阻值 (R)	電阻係數 (ρ)	截面積 (A)	長度 (ℓ)
SI 制	歐姆 (Ω)	歐姆 · 公尺 ($\Omega \cdot \text{m}$)	平方公尺 (m^2)	公尺 (m)

2-1 電阻及電導

- 例題 **2-1** 電阻值基本公式計算
- 有一採用鋁線的架空線路，長**2** 公里，截面積為 **14 mm²**，試求其線路電阻為多少歐姆？

$$\ell = 2 \text{ km} = 2 \times 10^3 \text{ m}$$

- 解 $A = 14 \text{ mm}^2 = 14 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ($\because 1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$, $1 \text{ mm}^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$)
鋁線的電阻係數 $\rho = 2.83 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

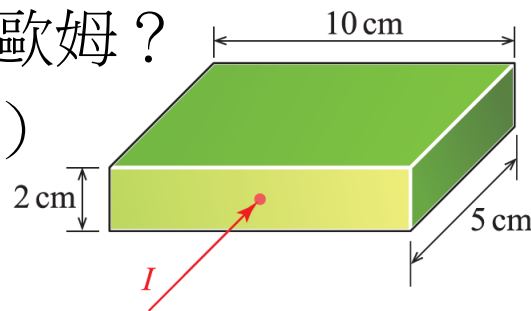
$$\text{代入公式 } R = \rho \times \frac{\ell}{A} = (2.83 \times 10^{-8}) \times \frac{2 \times 10^3}{14 \times 10^{-6}} = 4.04 \Omega$$

2-1 電阻及電導

- 練習
- 1. 有 5.5 mm^2 的標準韌銅導線一捲，長 100 m ，則其電阻約為多少 Ω ？
(A) 0.18 (B) 0.31 (C) 0.4 (D) 0.55 。

2-1 電阻及電導

- 例題 **2-2** 不同方向的電阻值運算
- 如圖所示，試求該白金導體的電阻為多少歐姆？
(註：白金的電阻係數 $\rho = 11 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。)



- 解

取電流方向的長度 $\ell = 5 \text{ cm} = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$

取電流方向的截面積 $A = 10 \times 2 = 20 \text{ cm}^2$

$$= 20 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

代入公式 $R = \rho \times \frac{\ell}{A} = (11 \times 10^{-8}) \times \frac{5 \times 10^{-2}}{2 \times 10^{-3}} = 2.75 \times 10^{-6} \Omega$

2-1 電阻及電導

- 練習
- 2. 如例題圖，若電流方向改成從左側流入的話，則其電阻為多少 $\mu\Omega$ ？
(A) 11 (B) 7.25 (C) 5.5 (D) 2.75。

2-1 電阻及電導

- 例題 **2-3** 改變面積／長度的電阻值運算
- 有一根圓柱形導線其電阻為 **$5\ \Omega$** ，將其拉長使其長度為原來的兩倍，假設原有的體積及形狀並未改變，試求拉長後的電阻為多少歐姆？

體積 = 面積 $\times$ 長度，當體積不變時，長度加倍，截面積將會減半

- 解 即： $\ell_2 = 2\ell_1$ ， $A_2 = \frac{1}{2} A_1$

$$R_2 = \rho \times \frac{\ell_2}{A_2} = \rho \times \frac{2\ell_1}{\frac{1}{2} A_1} = 4R_1 = 4 \times 5 = 20\ \Omega$$

2-1 電阻及電導

- 練習
- 3. A 、 B 兩導體以相同材料製成， A 的直徑為 1.6 mm 、長度為 10 m ，電阻 1Ω ； B 的直徑為 0.8 mm 、長度為 40 m ，則導體 B 的電阻為多少 Ω ？
(A) 0.25 (B) 0.5 (C) 4 (D) 16 。

2-1 電阻及電導

• 2-1.2 電導及電導係數

- 電導（**conductance**）為電阻的倒數，用來表示物質容許電荷流動的能力，以**G**表示，即

$$G(\text{電導}) = \frac{1}{R} = \frac{1}{\rho} \times \frac{A}{\ell} = \sigma(\text{電導係數}) \times \frac{A}{\ell} \quad (\text{西門子, S})$$

公式
2-2

註 電導的單位早期曾經使用過姆歐（mho），符號為 $\mathfrak{U}$ ；現在大多使用西門子（S）為單位。

- σ （讀作**sigma**）為電導係數，是電阻係數的倒數，以標準韌銅為例：
- $\sigma(\text{標準韌銅}) \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1.724 \times 10^{-8}} = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ （西門子／公尺）

2-1 電阻及電導

- 在實用上，各種材料的電導係數是以百分率表示，並且規定以標準韌銅的電導係數為基準（100%），則某一材料的百分率電導係數（ $\sigma\%$ ）為：

$$\sigma\% = \frac{\text{該材料的電導係數}}{\text{標準韌銅的電導係數}} \times 100\%$$
$$\text{或 } \sigma\% = \frac{\text{標準韌銅的電阻係數}}{\text{該材料的電阻係數}} \times 100\%$$

公式
2-3

2-1 電阻及電導

- 將表2-1 所列的電阻係數值代入（2-3）公式，計算可得其百分率電導係數，如表2-3 所示。

表 2-3 常用材料的百分率電導係數（在 20°C 時）

材料種類		導電率 (σ %)	材料種類		導電率 (σ %)
1	銀	104.9%	6	鎢	30.8%
2	標準韌銅	100.0%	7	鐵	17.2%
3	硬抽銅	97.2%	8	矽鋼	2.8%
4	金	71.6%	9	水銀	1.8%
5	鋁	60.8%	10	碳	0.05%

導電性愈好者：電阻係數愈小，百分率電導係數愈大

導電性愈差者：電阻係數愈大，百分率電導係數愈小

2-1 電阻及電導

- 例題 **2-4** 電阻與電導關係
- 有 A 、 B 兩導線測得電阻分別為 $20\ \Omega$ 及 $50\ \Omega$ ，則
(1) 其電導分別為何？ (2) 何者的導電性較佳？
- 解 (1) $G_A = \frac{1}{R} = \frac{1}{20} = 0.05\ \text{S}$ （西門子）， $G_B = \frac{1}{R} = \frac{1}{50} = 0.02\ \text{S}$ （西門子）
(2) $\because G_A > G_B$ 故 A 導線的導電性較佳
- 練習
- 4. 有一材料其電導值為 $125 \times 10^4\ \text{S}$ ，則其電阻值為何？
(A) $0.8\ \mu\Omega$ (B) $0.8\ \text{m}\Omega$ (C) $8\ \Omega$ (D) $125\ \Omega$ 。

2-1 電阻及電導

- 例題 **2-5** 求導電率
- 表2-3 中，鋁的導電率為60.8%，如何求得？

- 解 由表 2-1 得知： ρ （標準韌銅） $= 1.724 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ，
 ρ （鋁） $= 2.83 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 。

$$\begin{aligned}\text{代入 (2-3) 公式 } \sigma(\text{鋁}) \% &= \frac{\text{標準韌銅的電阻係數}}{\text{鋁的電阻係數}} \times 100\% \\ &= \frac{1.724 \times 10^{-8}}{2.83 \times 10^{-8}} \times 100\% = 60.8\%\end{aligned}$$

- 練習
- 5. 在計算導電百分率 $\sigma\%$ 時，應該以何種材料為基準？
(A) 標準韌（軟）銅 (B) 標準抽銅 (C) 銀 (D) 鐵。

2-2 各種電阻器

- **2-2.1 一般電阻器**

- 1. 電阻器的規格

- 在電路中加入適當的電阻，可以控制電路中的電流，以及獲得需要的電壓，那麼要如何選擇一個合適的電阻器呢？首先從電阻器的規格談起，通常包括：電阻值、誤差值、額定功率、材質及工作方式等；例如：

2-2 各種電阻器



2-2 各種電阻器

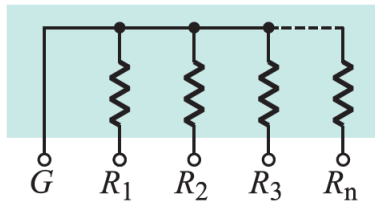
- 2. 固定電阻器
- 在正常使用情形下，其電阻值為固定不變者，稱為固定電阻器（**fixed resistor**）；圖2-2 為固定電阻的符號，有單一電阻及排阻兩類。固定電阻器依其製造所用材質不同，分類如圖2-2所示。



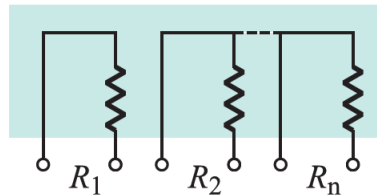
(a) 單一電阻
(一般標示)



(b) 單一電阻
(歐洲標示)



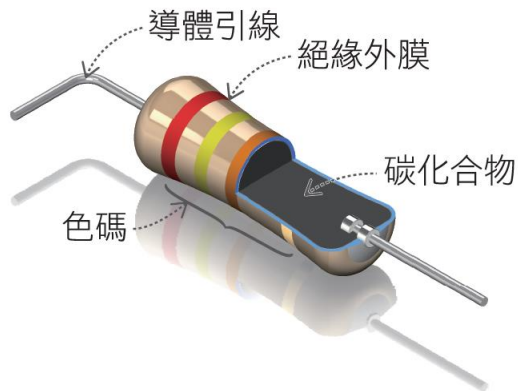
(c) A 型排阻
(有一共用接點)



(d) B 型排阻
(數個獨立電阻)

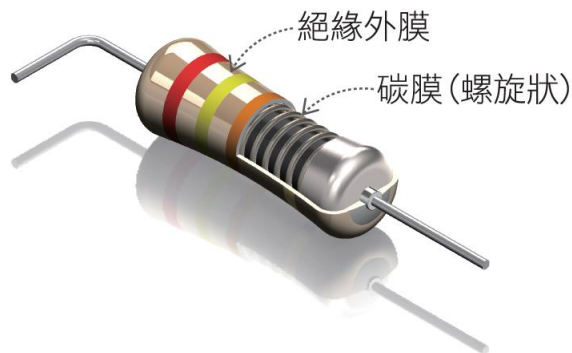
圖 2-2 固定電阻器符號

2-2 各種電阻器



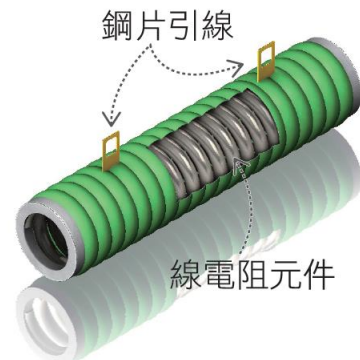
(a) 碳質電阻器

以碳、石墨及填充劑膠合而成，功率小、誤差大。



(b) 碳膜電阻器

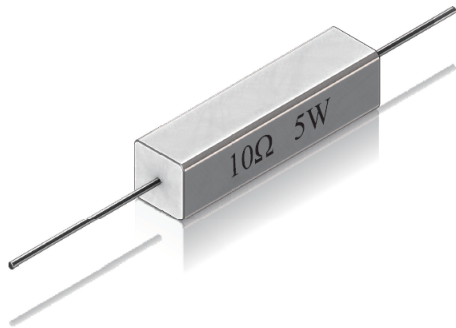
將碳粉塗於絕緣材料上，再以機械切成槽溝，並以槽溝的大小決定電阻值，其功率小，誤差較碳質電阻小。



(c) 線繞電阻器

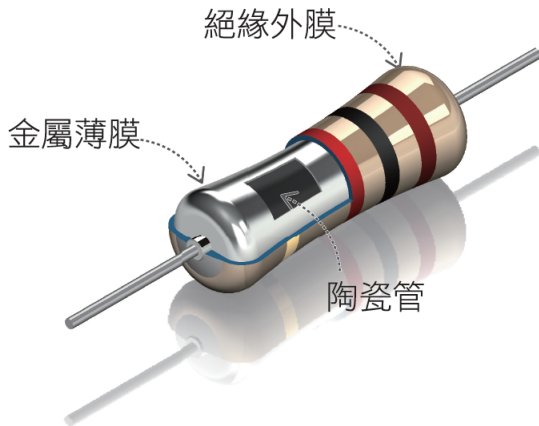
將金屬線繞在瓷管上，再以樹脂封固而成，可耐受較高的功率，誤差可低至1%以內，穩定性也較佳。

2-2 各種電阻器



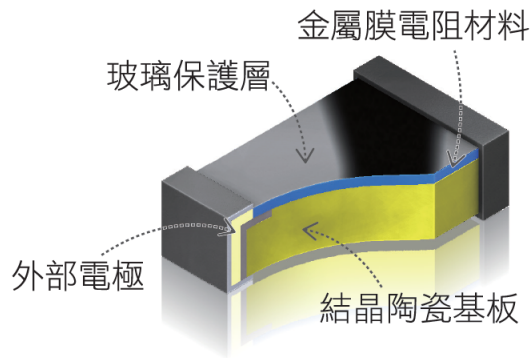
(d) 水泥電阻器

將線繞電阻以耐熱水泥密封而成，用於高功率、低誤差處。



(e) 金屬膜電阻器

將金屬氧化物薄膜塗著於絕緣管上而成，具有高功率、低誤差、高電阻係數及穩定性佳的特性。



(f) 晶（貼）片電阻器

以精純氧化鋁結晶陶瓷基板，印上金屬厚膜導體，再於外層塗上玻璃釉而製成，體積小、功率高、成本較低，適用於3C產品。

圖 2-3 各種常用的固定電阻器

2-2 各種電阻器



延伸知識

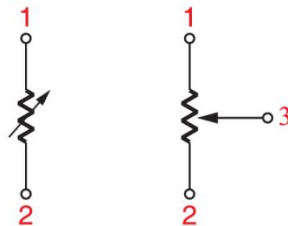
電阻器依外觀而分有：**SMD** 和 **DIP** 包裝方式

SMD：稱為表面黏著元件（surface mount device），具有短小輕薄的特點，可以直接以表面黏著技術裝置於電路板上，不僅生產速度更快、元件密度更高、縮小成品體積，而且耗電量更少，品質更穩定。

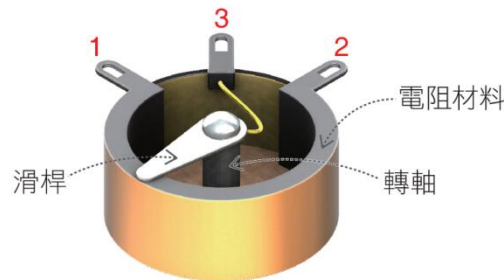
DIP：稱為雙排式包裝（dual in-line package），其引接腳在元件兩側，是比較傳統的包裝，通常以整捲式包裝，可置於機台進行自動作業。

2-2 各種電阻器

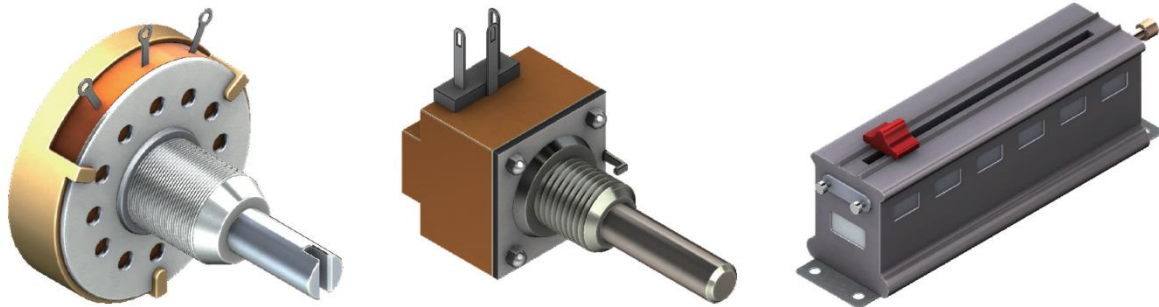
- 3. 可變電阻器
- 透過旋轉角度的改變，或滑動軸的移動來改變其電阻值的電阻器，稱為可變電阻器（variable resistor，簡稱VR），如圖2-4所示，常用於音量調整、燈光明亮調整等。



(a) 可變電阻器符號



(b) 內部結構



(c) 實體圖

圖 2-4 各種常用的可變電阻器

2-2 各種電阻器

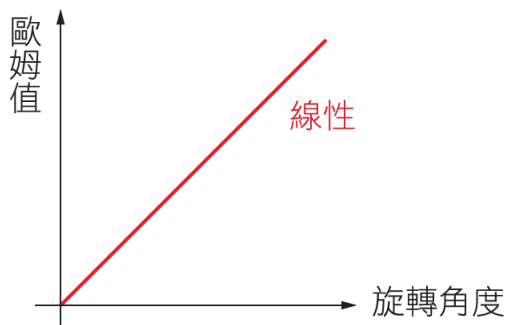


延伸知識

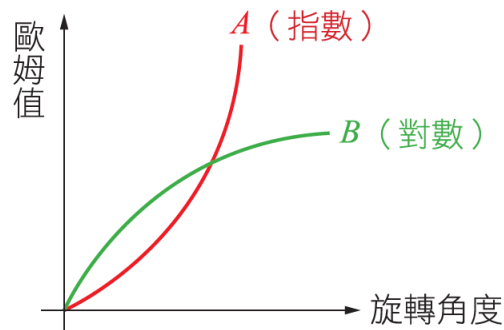
可變電阻器依旋轉角度與電阻值的關係而分有：

線性可變電阻：電阻值的變化量與旋轉角度成正比，如圖 (1)(a) 所示。

非線性可變電阻：電阻值的變化量與旋轉角度成指數或對數關係，如圖 (1)(b) 所示。



(a) 線性



(b) 非線性

圖 (1) 可變電阻的變化情形

2-2 各種電阻器

- 4. 半可調電阻器
- 半可調電阻器體積小，必須以一字起子才能調整其值，通常用於電路校正，一經調定後，就固定其值不再變動，如圖2-5所示。

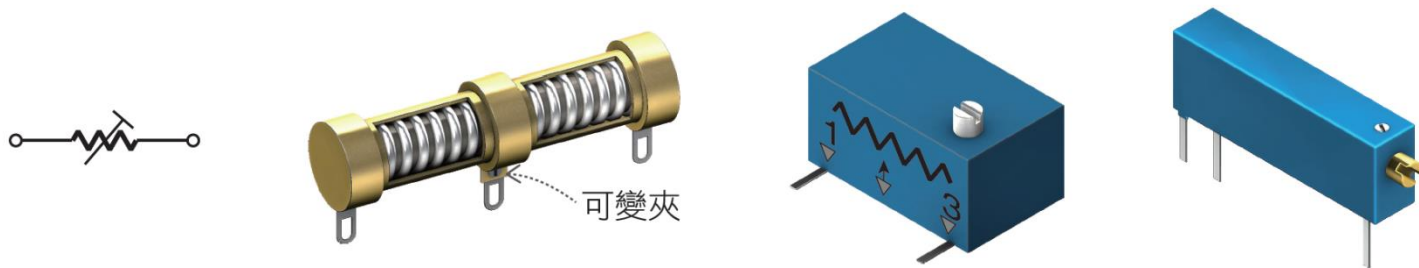


圖 2-5 半可調電阻器

2-2 各種電阻器

- **2-2.2 特殊電阻器**
- 除了前述一般電阻器外，尚有一些特殊用途的電阻器，其電阻值會隨著材料特性自動變化，常見的有光敏電阻及熱敏電阻，介紹如下：
- **1. 光敏電阻**
- 以硫化鎘（**CdS**）或硒化鎘（**CdSe**）為材料製成，如圖2-6 所示，特性是元件受光線照射時，其內部電阻會隨之下降；換言之，其電阻值與光線強度成反比，光敏電阻用於光度檢測的自動開關。

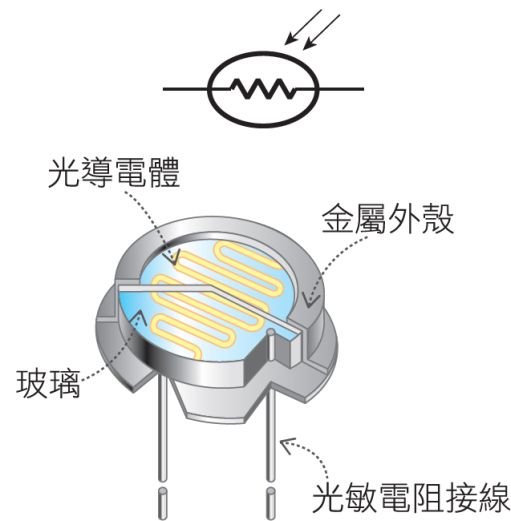


圖 2-6 光敏電阻

2-2 各種電阻器

- 2. 熱敏電阻
- 熱敏電阻以鈷、鎳、錳等金屬製成，如圖2-7所示，用於溫度控制開關，其特性是電阻值會隨溫度的改變而改變；分成：
- 1. 熱阻器（**thermistor**）：溫度上升，電阻值減少，屬於負溫度係數型（**negative thermal coefficient**，簡稱**NTC**）。
- 2. 敏阻器（**sensistor**）：溫度上升，電阻值增加，屬於正溫度係數型（**positive thermal coefficient**，簡稱**PTC**）。有關溫度係數的介紹詳見2-4 節「電阻溫度係數」。

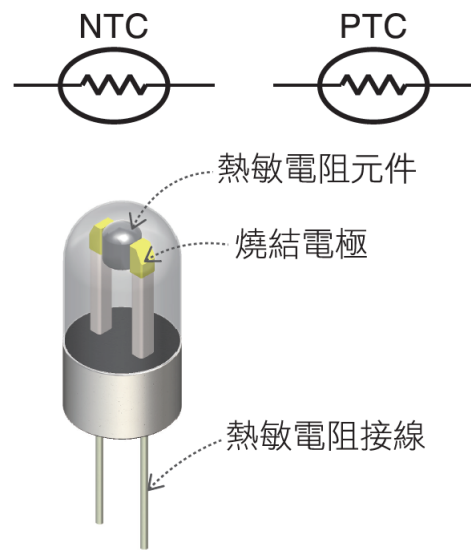


圖 2-7 熱敏電阻

2-2 各種電阻器

- **2-2.3 色碼電阻器**

- 電阻器在其電阻值的標示方法上有兩種做法：

- **1. 文數字標示法：**將電阻值直接以文數字標示在晶片電阻器上。

- ①文字上以**R**表示小數點，例如：**1R5**表示 **1.5Ω** ，**R12**表示 **0.12** 。

- ②以乘冪符號表示大小，例如：**3K3**表示 **$3.3\text{ k}\Omega$** ，**3M9**表示 **$3.9\text{M}\Omega$** 。

- ③四位數字者，前三位數為有效數字，第四位為**10**的幾次方，例如：**1502** 表示 **$150 \times 10^2 = 15\text{ k}\Omega$** 。

- ④三位數字者，第三位為**10**的幾次方，例如：**683**表示 **$68 \times 10^3 = 68\text{ k}\Omega$** 。

2-2 各種電阻器

- **2.色碼標示法：**將電阻值以環狀色帶來表示的電阻器，稱為色碼 電阻器；主要用於體積小、功率小（例如 $1/4\text{ W}$ 、 $1/2\text{ W}$ ）的碳質、碳膜及金屬膜電阻。色碼電阻器的色碼標示有三環、四環、五環三種方式，如圖2-8 為四環和五環式色碼電阻標示
- 說明：

2-2 各種電阻器

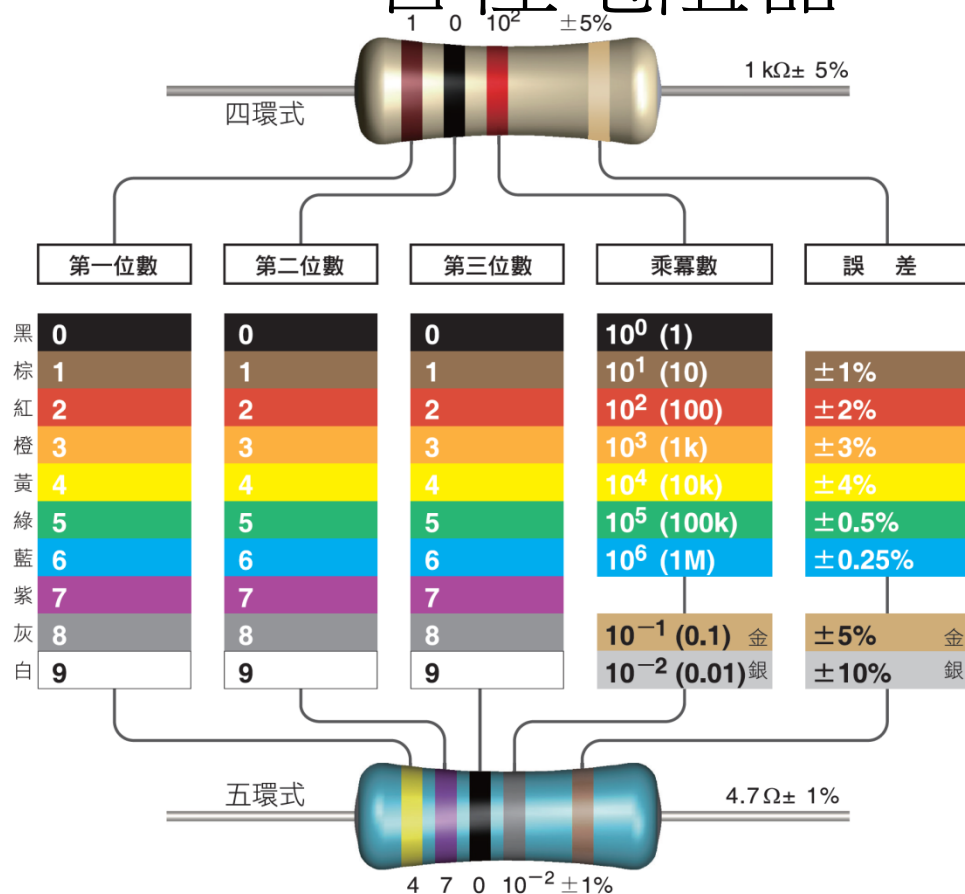


圖 2-8 四環和五環電阻色碼標示

2-2 各種電阻器

- 1. 三環式和四環式
- 三環式和四環式的差異：三環式其誤差均為**20%**，故沒有誤差環，四環式則多了誤差環；其餘前三環是一樣的。

2-2 各種電阻器

- 例題 **2-6** 色碼電阻值範圍計算
- 如圖所示，有一電阻器的色碼標示依序為「紅黃棕銀」，試求該電阻值的範圍為何？



(紅、黃、棕、銀)

- 解

根據前述， $R=24 \times 10^1 \Omega \pm 10\% = 240 \Omega \pm 10\%$

最大值： $240 + 240 \times 10\% = 264 \Omega$

最小值： $240 - 240 \times 10\% = 216 \Omega$

表示該電阻器的電阻值介於 $216 \Omega \sim 264 \Omega$ 之間均有可能；
正確值可以三用電表量測之。

2-2 各種電阻器

- 練習
- 6. 如圖所示為一四色環電阻，其電阻值最不可能為何？
(A) $1.03 \text{ k}\Omega$ (B) $1.0 \text{ k}\Omega$ (C) $0.96 \text{ k}\Omega$
(D) $0.90 \text{ k}\Omega$ 。

2-2 各種電阻器

- 例題 **2-7** 三／四環式色碼電阻值判讀
- 下圖所列各色碼電阻器的數值各為何？



- 解

$$(1) R_1 = 47 \times 10^4 \, \Omega \pm 5\% = 470 \, \text{k}\Omega \pm 5\%$$

$$(2) R_2 = 10 \times 10^{-1} \, \Omega \pm 10\% = 1 \, \Omega \pm 10\%$$

$$(3) R_3 = 51 \times 10^1 \, \Omega \pm 20\% = 510 \, \Omega \pm 20\%, \text{ 三環式誤差} \pm 20\%$$

2-2 各種電阻器

- 練習
- 7. 電阻值若為 $120 \pm 5\% \Omega$ ，則其色碼依順序為何？
(A) 黑棕黑金 (B) 黑棕黑銀 (C) 棕紅棕金
(D) 棕紅棕銀。

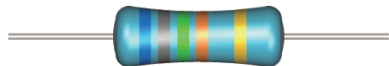
2-2 各種電阻器

- 2. 五環式
- 五環式較四環式多了第三位數字，用於誤差較小的精密電阻標示。

2-2 各種電阻器

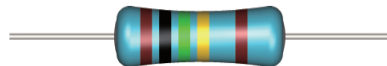
- 例題 **2-8** 五環式色碼電阻值判讀
- 下圖所列各色碼電阻器的數值各為何？

(1) R_1



(藍、灰、綠、橙、金)

(2) R_2



(棕、黑、綠、金、棕)

- 解

$$(1) R_1 = 685 \times 10^3 \Omega \pm 5\% = 685 \text{ k}\Omega \pm 5\%$$

$$(2) R_2 = 105 \times 10^{-1} \Omega \pm 1\% = 10.5 \Omega \pm 1\%$$

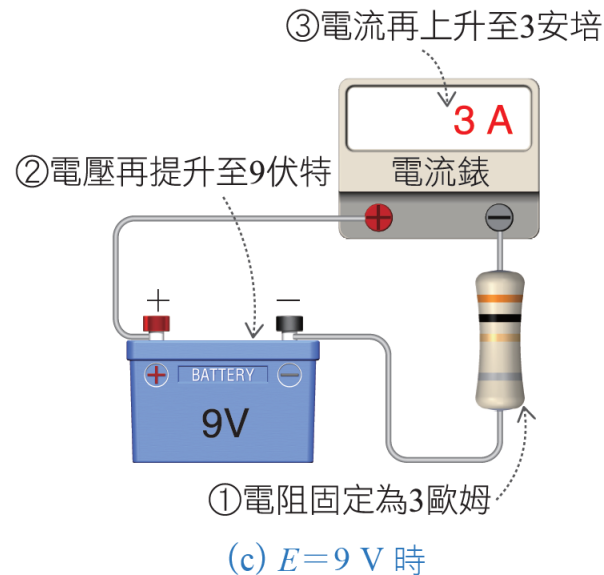
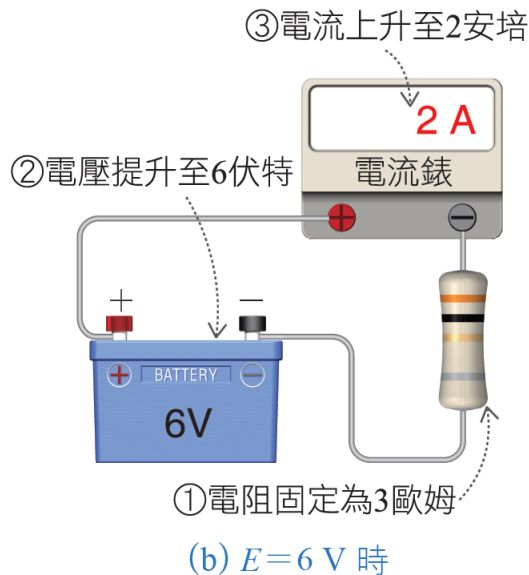
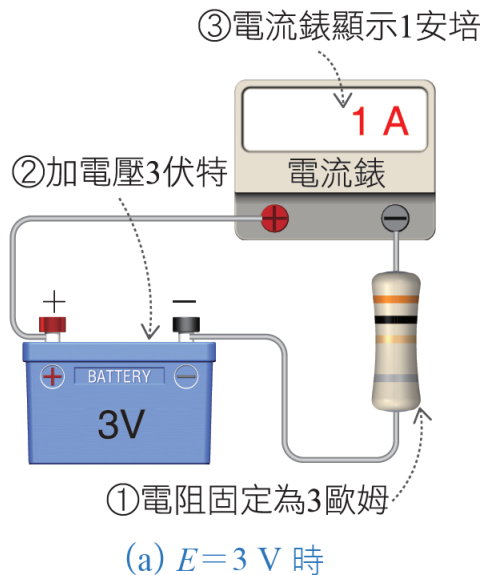
2-2 各種電阻器

- 練習
- 8. 有一精密電阻，其標示為「棕紅紅紅棕」，則其電阻值為何？
(A) $12.2 \text{ k}\Omega \pm 1\%$ (B) $1.22 \text{ k}\Omega \pm 1\%$
(C) $1.22 \text{ k}\Omega \pm 2\%$ (D) $122 \text{ k}\Omega \pm 2\%$ 。

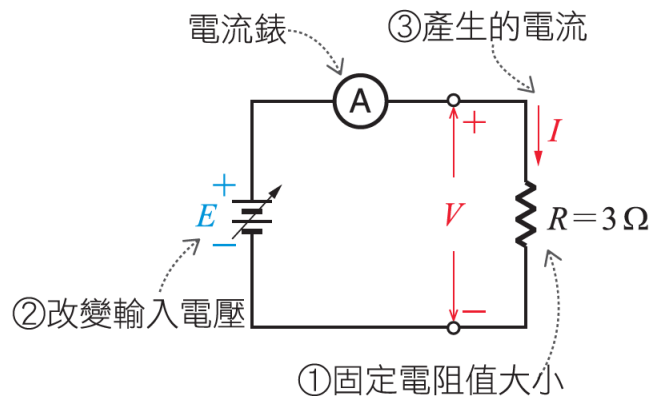
2-3 歐姆定律

- 西元1826 年德國物理學家歐姆（**George Simon Ohm**），在相同的溫度下進行電路實驗發現：
- **1.**電阻不變時，所加電壓愈大，所產生的電流愈大；將電壓、電流的變化以描點作圖法繪出，可得一上升直線，而此直線的斜率 $\frac{V}{I}$ ，就是該電阻器的電阻值 R ，如圖2-9所示。
 **註** 假設線路及電流錶均無電壓降，即 $E=V$ 。

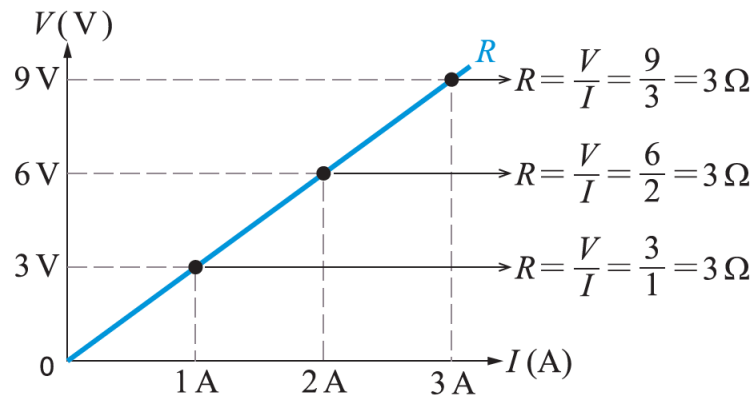
2-3 歐姆定律



2-3 歐姆定律



(d) 等效電路

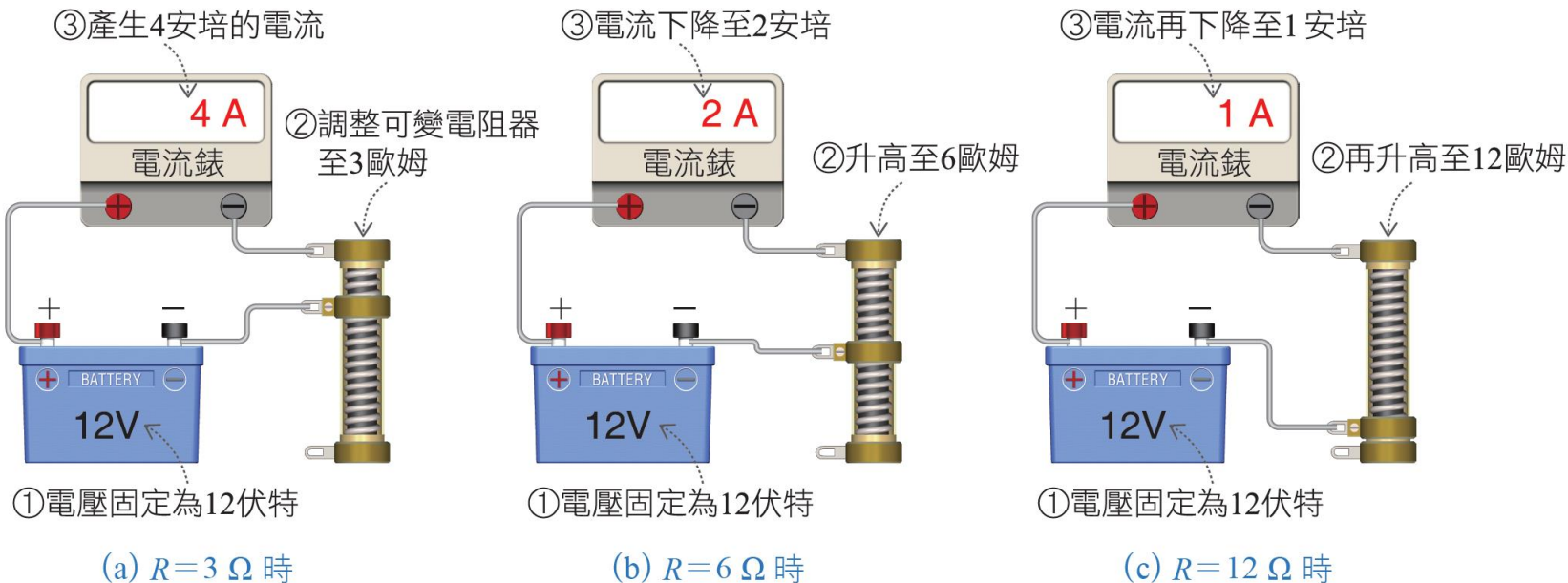


(e) $V-I$ 關係 (線性上升)

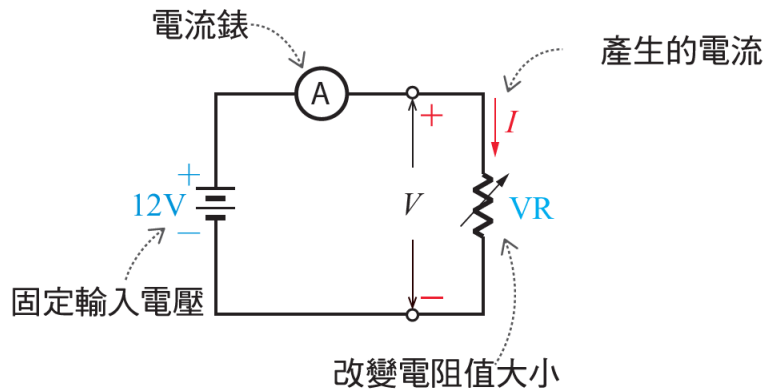
圖 2-9 歐姆定律實驗 (一)：電阻不變時，所加電壓愈大，電流愈大

2-3 歐姆定律

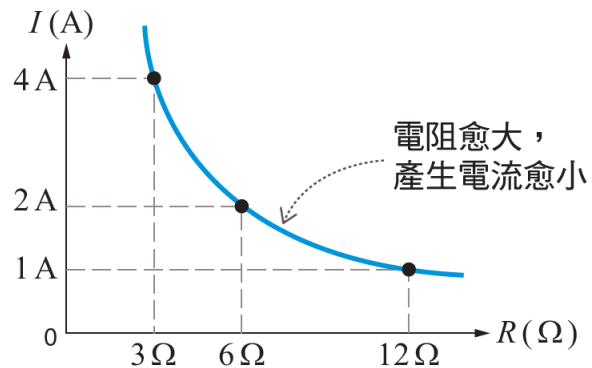
- **2.**外加電壓不變時，負載電阻愈大，所產生之電流愈小；將電阻、電流的變化以描點作圖法繪出，可得一下降曲線，如圖2-10 所示。



2-3 歐姆定律



(d) 等效電路



(e) $I-R$ 關係 (下降曲線)

圖 2-10 歐姆定律實驗 (二)：外加電壓不變時，電阻愈大，電流愈小

2-3 歐姆定律

- 綜合兩者之結論：電路中，流經某一元件的電流（ I ），與該元件的端電壓（ V ）成正比，而與該元件之電阻值（ R ）成反比，這個發現稱為歐姆定律（Ohm's law），以數學式表示為：

$$I \text{ (電流)} = \frac{V \text{ (電壓)}}{R \text{ (電阻)}} \quad (\text{安培, A})$$

公式
2-4

- 這個公式是電學中最基本也是最重要的一個公式，此公式依其變動項目的不同，可以有不同的表示方式：

$$V = I \times R \quad \text{或} \quad R = \frac{V}{I}$$

公式
2-5

2-3 歐姆定律

- 例題 **2-9** 歐姆定律—基本運算
- 有一電爐的電熱絲電阻為 $10\ \Omega$ ，通以 $110\ \text{V}$ 的電壓時，試求流過電爐的電流為何？

• 解

依據歐姆定律
$$I = \frac{V}{R} = \frac{110}{10} = 11\ \text{A}$$

2-3 歐姆定律

- 練習
- 9. 有一只電阻器其大小為 $500\ \Omega$ ，且已知其上通過之電流為 $20\ \text{mA}$ ，則該電阻端電壓為何？
(A) $10\ \text{mV}$ (B) $10\ \text{V}$ (C) $100\ \text{V}$ (D) $10\ \text{kV}$ 。
- 10. 有一 $0.15\ \text{A}$ 的電流流過一色碼電阻，跨在此色碼電阻兩端的電壓為 $1.5\ \text{V}$ ，則此電阻由左至右之色碼可能為何？
(A) 紫藍黑金 (B) 紫藍棕金 (C) 棕黑棕銀
(D) 棕黑黑銀。

2-3 歐姆定律

- 例題 **2-10** 電位差及歐姆定律應用
- 如圖所示之電路，試求：
- (1) A 、 B 兩點電位差 (2) 電流大小 (3) 電流方向。

• 解

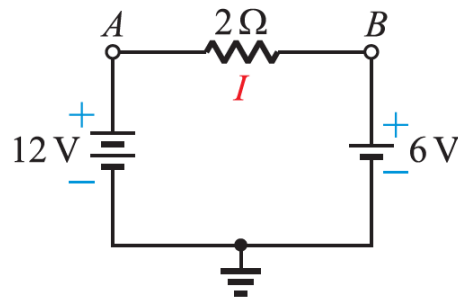
(1) 求 A 、 B 兩點電位差 V_{AB}

$$V_A = 12 \text{ V}, V_B = 6 \text{ V}$$

$$V_{AB} = V_A - V_B = 12 - 6 = 6 \text{ V}$$

(2) 求電路電流 $I = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{6}{2} = 3 \text{ A}$

(3) 求電流方向，由高電位流向低電位，即 A 流向 B 。



2-3 歐姆定律

- 練習
- 11. 將本例題圖中的6 V 電池極性反向，則 I 為何？
(A) 1 A (B) 3 A (C) 6 A (D) 9 A。

2-3 歐姆定律

- 在1-7 節「電功率」之公式（1-9）中，電功率 $P=V \times I$ ，今將公式（2-5）代入，可改寫為：

$$P = V \times I = (I \times R) \times I = I^2 \times R$$

或
$$P = V \times I = V \times \frac{V}{R} = \frac{V^2}{R} \quad (\text{瓦特, W})$$

公式
2-6

2-3 歐姆定律

- 例題 **2-11** 通以電壓額定值一半的燈泡性能
- 有一鎢絲燈泡額定為**220 V**、**100 W**，今通以**110 V** 的電壓，試求該燈泡之**(1) 電阻** **(2) 通過的電流** **(3) 實際消耗的功率**分別為何？
- 解

(1) 求該燈泡之電阻

依據 (2-6) 公式 $P_1 = V_1 \times I_1 = \frac{V_1^2}{R}$

故燈泡之電阻 $R = \frac{V_1^2}{P_1} = \frac{(220)^2}{100} = 484 \, \Omega$

(2) 求燈泡通過的電流

依據歐姆定律得 $I_2 = \frac{V_2}{R} = \frac{110}{484} = 0.227 \, \text{A}$

2-3 歐姆定律

(3) 求燈泡實際消耗功率，有三種做法：

$$P_2 = V_2 \times I_2 = 110 \times 0.227 = 25 \text{ W} \quad \text{或}$$

$$P_2 = \frac{V_2^2}{R} = \frac{110^2}{484} = 25 \text{ W} \quad \text{或}$$

$$P_2 = I_2^2 \times R = (0.227)^2 \times 484 = 25 \text{ W}$$

結果一樣（ $\because P = \frac{V^2}{R}$ ， $\therefore$ 電壓減半，功率降至 $\frac{1}{4}$ ，即 $P_2 = \frac{1}{4} \times P_1 = \frac{1}{4} \times 100 = 25 \text{ W}$ ）

2-3 歐姆定律

- 練習
- 12. 某一車用頭燈其規格標示為 12 V 、 55 W ，當頭燈點亮時用三用電錶量測其兩端直流電壓為 11.8 V ，則流過該頭燈之電流合理值約為多少？
(A) 5.8 A (B) 4.5 A (C) 3.3 A (D) 1.3 A 。
- 13. 有一規格為 5 W 、 110 V 的電燈泡，將該燈泡接於 55 V 電源時，此時電燈泡之電阻為多少 Ω ？
(A) 2420 (B) 1220 (C) 242 (D) 120 。

2-3 歐姆定律

- 例題 **2-12** 不同瓦特數燈泡的電阻值
- 三個電燈泡之規格分別為 **10 W / 120 V**、**20 W / 120 V**、**30 W / 120 V**，試問(1) 何者的電阻值最小？(2) 三個燈泡電阻（內阻）比為何？
- 解
 - (1) $R = \frac{V^2}{P}$ ， R 和 P 成反比，故 **30 W / 120 V** 的電阻值最小
 - (2) $R_1 : R_2 : R_3 = \frac{1}{10} : \frac{1}{20} : \frac{1}{30} = 6 : 3 : 2$ （分母通分）
- 練習
- 14. 有一電熱線式電暖器，依其暖度強弱分成強、中、弱三段，試問哪一段的總電阻值最大？ (A) 強 (B) 中 (C) 弱 (D) 都一樣。

2-3 歐姆定律

- 例題 **2-13** 電阻線拉長後的電阻、電流及電功率
- 將100 V 電壓加至某電阻線上，通過之電流為16 A，今若將此電阻線均勻拉長，使長度變為原來的2 倍，在相同的電壓下，試求
(1) 電阻 (2) 通過之電流 (3) 消耗的功率，分別為原來的多少倍？

2-3 歐姆定律

- 解 體積 $= A \times \ell$ 值不變， $\ell_2 = 2\ell_1$ ， $A_2 = \frac{1}{2} A_1$ ；

根據 $R = \rho \frac{\ell}{A}$ ， $R_2 = \rho \times \frac{2\ell_1}{\frac{1}{2} A_1} = 4R_1$ ，電阻變為原來的 4 倍；

根據 $I = \frac{V}{R}$ ，電流變為原來的 $\frac{1}{4}$ 倍；

根據 $P = \frac{V^2}{R}$ ，消耗功率也是原來的 $\frac{1}{4}$ 倍。

2-3 歐姆定律

- 練習
- 15. 某直徑為1.6 mm 單心線的配線迴路，其線路電壓降為6%；若將導線換成相同材質的2.0 mm 單心線後，其線路電壓降約為何？
(A) 3.8% (B) 4.8% (C) 5.8%
(D) 6.8%。

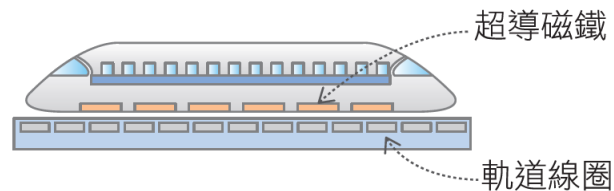
2-3 歐姆定律



延伸知識

超導體（superconductor）與磁浮列車

超導體是一種導電性較一般導體更佳的「超級導體」，當溫度達該材料的絕對溫度時，具有零電阻以及反磁性的特性；超導體的反磁性類似磁鐵的相斥性，如果將其置於火車車體內，而在軌道上佈置電磁鐵，便成為磁浮列車，由於它與地面沒有接觸，沒有摩擦力，可以減少震動，增加舒適性，而且時速可達 500 公里。



2-3 歐姆定律



訂定歐姆定律的科學家—歐姆（George Simon Ohm, 1789-1854）

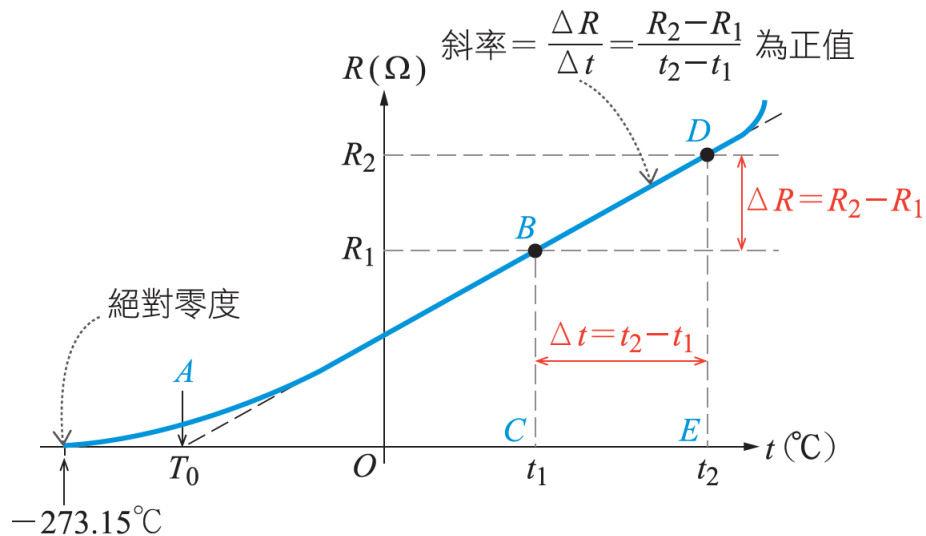
歐姆出生於巴伐利亞的工匠家庭，小時候因父親教導其數學、物理、化學和哲學，打下良好的科學和數學基礎，1805 年就讀埃爾蘭根大學，曾任職中學數學教師，1811 年取得博士學位，1827 年出版「通電電路的數學研究」著作，提出說明電流和電壓關係的歐姆定律，深深影響電學的發展，1841 年倫敦皇家學院頒授獎章肯定他的成就；為了紀念歐姆的卓越成就，電阻值的大小以歐姆（ Ω ）為單位。



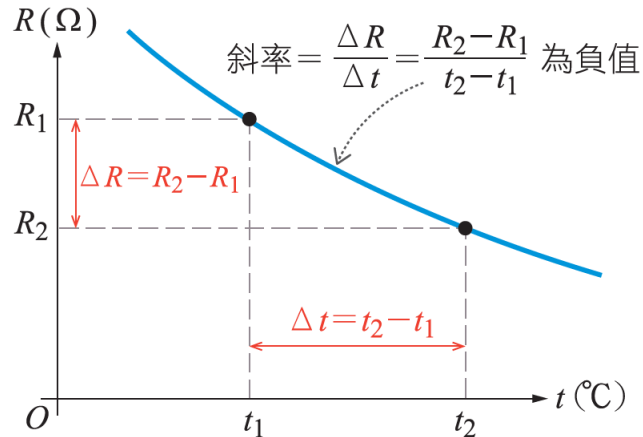
2-4 電阻溫度係數

- **2-4.1 電阻值與溫度的關係**
- 在這一節要探討的是：溫度的變化對各種物質之電阻的影響，這種影響的程度以「電阻溫度係數」表示之，有兩種情況：
- **1. 正電阻溫度係數：**溫度升高，電阻值隨之升高者，如圖 2-11(a) 所示，其斜率為正；一般金屬導體皆具有正電阻溫度係數。
- **2. 負電阻溫度係數：**溫度升高，電阻值隨之下降者，如圖 2-11(b) 所示，其斜率為負；絕緣體及半導體具有負電阻溫度係數。

2-4 電阻溫度係數



(a) 正溫度係數的 R - t 關係曲線



(b) 負溫度係數的 R - t 關係曲線

圖 2-11 電阻與溫度的關係

2-4 電阻溫度係數

- 換言之，溫度升高時，對金屬導體而言，其電阻值升高，導電性變差；對絕緣體或半導體而言，電阻值反而變小，導電能力增加；因此要使電器用品的電路正常運作，必須注意周圍溫度的變化。
- 以正溫度係數的金屬導體而言，圖2-11(a)中， T_0 表示電阻為 $0\ \Omega$ 時的溫度，這個溫度稱為該材料的絕對溫度（**absolute temperature**），每一種物質的絕對溫度均不同，如表2-4 所示。

註 電阻值為 0 的導體稱為超導體。

表 2-4 常用金屬導體的絕對溫度（ T_0 ）值

材料	金	銀	鋁	軟銅	鎢	鐵	鎳
絕對溫度 (T_0)	-273°C	-243°C	-236°C	-234.5°C	-204°C	-180°C	-147°C

2-4 電阻溫度係數

- 圖2-11(a) 中， $\triangle ABC$ 與 $\triangle ADE$ 為兩相似三角形，根據相似三角形對邊成正比的定義，得知：

$$\frac{\overline{DE}}{\overline{BC}} = \frac{\overline{AE}}{\overline{AC}} = \frac{\overline{AO} + \overline{OE}}{\overline{AO} + \overline{OC}}$$

2-4 電阻溫度係數

以實際電阻與溫度值代入上式，其中 $\overline{AO}$ 為絕對溫度 T_0 ，可得：

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{|T_0| + t_2}{|T_0| + t_1} \quad (\text{適用一般金屬導體})$$

公式
2-7

以「軟銅」材料為例， $T_0 = -234.5$ ，絕對值 $|T_0| = 234.5$ ，代入可得：

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{234.5 + t_2}{234.5 + t_1} \quad (\text{適用軟銅導體})$$

公式
2-8

2-4 電阻溫度係數

- 例題 **2-14** 溫度變化對銅線電阻的影響
- 有一電動機內部銅線線圈， 25.5°C 測得電阻為 $10\ \Omega$ ，運轉一段時間後，電阻變成 $11\ \Omega$ ，試求此時線圈之溫度為多少 $^{\circ}\text{C}$ ？（一般銅線線圈係採用軟銅）

- 解 應用 (2-8) 公式

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{234.5 + t_2}{234.5 + t_1} \Rightarrow \frac{11}{10} = \frac{234.5 + t_2}{234.5 + 25.5}$$

解得 $t_2 = 51.5^{\circ}\text{C}$

- 練習
- 16. 某銅線在溫度 5.5°C 時其電阻為 $1.6\ \Omega$ ，當溫度上升至 35.5°C 時其電阻應為多少 Ω ？ (A) 1.8 (B) 2.6 (C) 3.2 (D) 4.5。

2-4 電阻溫度係數

- **2-4.2 電阻溫度係數的定義**
- 接著，為任何物質的電阻溫度係數下一個定義：該物質「溫度每升高 1°C 所增加的電阻值」與「原來電阻值」的比值，稱為該物質在原來溫度時的電阻溫度係數。電阻溫度係數通常以 α 表示，參考圖2-11(a)，得數學式為：

$$\alpha_1 = \frac{\frac{\Delta R}{\Delta t}}{R_1} = \frac{\frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1}}{R_1} \quad \left(\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \text{ 或 } ^{\circ}\text{C}^{-1} \right)$$

公式
2-9

2-4 電阻溫度係數

- 將（2-9）公式整理後，可得：

$$R_2 = R_1 \times [1 + \alpha_1 \times (t_2 - t_1)] \quad (\text{歐姆}, \Omega)$$

公式
2-10

- 運用此式可以求得 0°C 及任何溫度的電阻溫度係數 α_0 及 α_t ，如下：
- 1.求 0°C 時的電阻溫度係數： α_0
- 在（2-10）公式中，假設原來溫度 t_1 為 0°C ，此時的電阻溫度係數為 α_0 ，則任何溫度（ t ）的電阻 R_t 為：

$$R_t = R_0 \times (1 + \alpha_0 \times t) \quad (\text{歐姆}, \Omega)$$

公式
2-11

2-4 電阻溫度係數

- 在 (2-10) 公式中，當溫度 t 為絕對溫度 $T_0^{\circ}\text{C}$ 時，由於此時電阻 $R_t=0\ \Omega$ ，得： $0=R_0\times(1+\alpha_0T_0)$ ，故 0°C 時的電阻溫度係數 α_0 為：

$$\alpha_0 = -\frac{1}{T_0} = \frac{1}{|T_0|} \quad \text{或} \quad T_0 = -\frac{1}{\alpha_0}$$

公式
2-12

- 以銅導體為例， 0°C 的電阻溫度係數

$$\alpha_0 = \frac{1}{|T_0|} = \frac{1}{234.5} = 0.00427。$$

2-4 電阻溫度係數

- **2** 求任何溫度時的電阻溫度係數： α_t
- 在(2-10)公式中，假設新的溫度 t_2 為絕對溫度 $T_0^\circ\text{C}$ ，此時的電阻 R_2 為0，且 R_t 和 α_t 分別為 $t^\circ\text{C}$ 時之電阻及其溫度係數，得：
- $0=R_t[1+\alpha_t(T_0-t)]$ 或 $0=1+\alpha_t(T_0-t)$

$$\text{故 } \alpha_t = -\frac{1}{-T_0+t} = \frac{1}{|T_0|+t} \quad \left(\frac{1}{^\circ\text{C}} \text{ 或 } ^\circ\text{C}^{-1}\right)$$

公式
2-13

- 以銅導體為例， 20°C 的電阻溫度係數為 α_{20} ，則

$$\alpha_{20} = \frac{1}{|T_0|+t} = \frac{1}{234.5+20} = 0.00393 \quad \left(\frac{1}{^\circ\text{C}} \text{ 或 } ^\circ\text{C}^{-1}\right)$$

2-4 電阻溫度係數

- 將表2-4 中各種材料的絕對溫度，代入（2-12）及（2-13）公式，可以求得各種材料在0°C 及20°C 的電阻溫度係數，如表2-5 所示。

表 2-5 常用材料的電阻溫度係數

材料種類		絕對溫度 (T_0)	0°C 的電阻溫度係數 (α_0) $\alpha_0 = \frac{1}{ T_0 }$	20°C 的電阻溫度係數 (α_{20}) $\alpha_{20} = \frac{1}{ T_0 + 20}$
1	金	-273°C	0.00370	0.00345
2	銀	-243°C	0.00412	0.00380
3	鋁	-236°C	0.00424	0.00391
4	軟銅	-234.5°C	0.00427	0.00393
5	鎢	-204°C	0.00495	0.00450
6	鐵	-180°C	0.00556	0.00500
7	鎳	-147°C	0.00680	0.00599

2-4 電阻溫度係數

- 例題 **2-15** 求任何溫度的電阻溫度係數（銅）
- 試求 15.5°C 時銅導體之電阻溫度係數為何？

• 解

根據（2-13）公式
$$\alpha_{15.5} = \frac{1}{|T_0| + t} = \frac{1}{234.5 + 15.5} = 0.004^{\circ}\text{C}^{-1}$$

- 練習
- 17. 精密儀表所用電阻器必須具有何種特性？ (A) 電阻係數大 (B) 電阻係數小 (C) 電阻溫度係數大 (D) 電阻溫度係數小。

2-4 電阻溫度係數

- 例題 **2-16** 求導體在不同溫度下的電阻
- 有一導體在 20°C 時之電阻為 $10\ \Omega$ ，電阻溫度係數為 0.005 ，試求該導體在 100°C 及 -100°C 時的電阻為多少 Ω ？

• 解

根據（2-10）公式： $R_2=R_1 [1+\alpha_1 (t_2-t_1)]$ ，此處 R_1 、 α_1 及 t_1 分別表示 20°C 時的電阻、電阻溫度係數及溫度值，故

(1) 100°C 時的電阻： $R_{100^{\circ}\text{C}}=10\times[1+0.005\times(100-20)]=14\ \Omega$

(2) -100°C 時的電阻： $R_{-100^{\circ}\text{C}}=10\times[1+0.005\times(-100-20)]=4\ \Omega$

2-4 電阻溫度係數

- 練習
- 18. 某一材料 30°C 時之電阻為 $50\ \Omega$ ，電阻溫度係數為 0.004 ，則該材料在 80°C 時的電阻值為何？
(A) $42\ \Omega$ (B) $54\ \Omega$ (C) $60\ \Omega$ (D) $80\ \Omega$ 。

2-5 焦耳定律

- **2-5.1 電流的熱效應**
- 在本章**2-1** 節「電阻及電導」中知道：電阻器在電路中具有限流及產生電位差的作用；然而，當電流流過電阻時，該電阻器內的電子在移動過程中，會因為相互碰撞而產生熱量，比較明顯的例如：電鍋內的電熱絲，將電能轉換成熱能用來煮飯；這種電流流過電阻器產生熱能的效應，稱為電流的熱效應（**heat effect**）。本節就是要來討論影響該熱效應的要素有哪些。

2-5 焦耳定律

- 西元**1841** 年英國物理學家焦耳（**James Joule**），進行兩個電路實驗：
- 實驗一：將相同大小的電流，加在不同材質的導體上。
- 發現：電阻值愈大的導體所產生的熱量愈多；而且通電的時間愈久，所產生的熱量也愈多。
- 實驗二：以不同的電流，加在相同材質的導體上。
- 發現：所產生的熱量與所加的電流成平方正比；即電流稍微增加，所產生的熱量卻增加很多。

2-5 焦耳定律

- **2-5.2 焦耳定律及其公式**
- 綜合上述兩個實驗的結論：電流流過導體所產生的熱量（ H ），與電阻值（ R ）、通電時間（ t ）成正比，與該電流平方（ I^2 ）亦成正比，此一關係為焦耳所發現，故稱為焦耳定律（**Joule's law**）。以數學式表示：

$$H \text{ (熱量)} = I^2 \times R \times t = P \times t = \frac{V^2}{R} \times t \quad (\text{焦耳, J})$$

$$\text{或 } H \text{ (熱量)} = 0.24 \times I^2 \times R \times t = 0.24 \times P \times t \quad (\text{卡, cal})$$

公式
2-14

2-5 焦耳定律

- 上式中，焦耳和卡都是熱量的單位，焦耳是一般能量的通用單位，熱量也是能量的一種形式；卡（**Calorie**，卡路里）則是常用的公制熱量單位，其定義是「使1公克的純水，在一標準大氣壓力之下，升高溫度 1°C 所需熱量稱為1卡」。其關係式為：

$$1 \text{ 卡} = 4.185 \text{ 焦耳} \approx 4.2 \text{ 焦耳} \quad \text{或} \quad 1 \text{ 焦耳} = 0.24 \text{ 卡}$$

公式
2-15



延伸知識

BTU (British thermal unit, 英制熱量單位)

BTU 也是熱量的單位，1 BTU 是指「使1磅的純水，在一標準大氣壓力之下，升高溫度 1°F 所需要的熱量」， $1 \text{ BTU} = 252 \text{ 卡} = 1055 \text{ 焦耳}$ 。

2-5 焦耳定律

- 另外，欲求得「使質量為 m 公克，比熱為 s 的物質，升高溫度 $T^{\circ}\text{C}$ 所需要的熱量」，也可以利用下列數學式計算：

$$H = m \times s \times \Delta T \quad (\text{卡, cal})$$

公式
2-16

2-5 焦耳定律

- 例題 **2-17** 焦耳定理公式應用
- 某電熱器電阻為 $10\ \Omega$ ，通入 $220\ \text{V}$ 電壓，試求1 分鐘內產生的熱能為多少焦耳？

- 解

應用（2-14）公式及歐姆定律：
$$H = \frac{V^2}{R} \times t = \frac{220^2}{10} \times 60 = 290400\ \text{J} \text{（焦耳）}$$

- 練習
- 19. 某 $20\ \Omega$ 電熱器，外加 $110\ \text{V}$ 電壓，求60 秒產生多少卡的熱量？(A) 2090 (B) 4836 (C) 7812 (D) 8712。

2-5 焦耳定律

- 例題 **2-18** 焦耳定律綜合應用
- 今有1 公升的水，要將它從20°C 加熱到100°C，需要多少熱量？又若使用1 kW的電熱器加熱，則需要多久的時間？

• 解

(1) 應用（2-16）公式求得加熱到100°C 所需熱量：

$$H = m \times s \times \Delta T = 1000 \times 1 \times (100 - 20) = 80000 \text{ cal (卡)}$$

(2) 應用（2-14）公式 $H = 0.24 \times P \times t = 0.24 \times 1000 \times t = 80000 \text{ cal (卡)}$

解得 $t = 333 \text{ 秒} = 5 \text{ 分} 33 \text{ 秒}$

2-5 焦耳定律

- 練習
- 20. 若使用200 V、15 A 的電熱水器，欲將2 公升水從60°C 加熱至100°C，則至少需要幾分鐘時間？
(A) 1 (B) 2 (C) 5 (D) 10。
- 21. 有一使用100 V 電源的電熱水器，其內部電阻為16 Ω ，裝有5 公升20°C 的水，開機10 分鐘，試問可使水溫上升幾度？
(A) 8°C (B) 12°C (C) 18°C (D) 24°C。

2-5 焦耳定律



延伸知識

冷氣機的冷氣能力

選購冷氣時必須考慮節能省電、靜音及價格等因素；省電以冷氣能力、EER 及 CSPF 為重要依據，說明如下：

1. 冷氣能力：冷氣機每小時可以移除熱量的能力

常用冷氣能力的單位有 kcal/h、BTU/h、kW 及冷凍噸。

(1) 1 kcal/h：每小時使 1 公斤 (kg) 的水，升高 1°C 所吸收的熱量。通常一坪大概需要 500 kcal 冷氣能力，西晒或頂樓則需上調至 600 至 650 kcal。

(2) 1 BTU/h：每小時使 1 磅 (lb) 的水，升高 1°F 所吸收的熱量。

$$1 \text{ kcal/h} = 3.968 \text{ BTU/h}, 1 \text{ BTU/h} = 0.252 \text{ kcal/h}$$

(3) 1 kW：SI 制的冷氣能力。

$$1 \text{ kW} = 860 \text{ kcal/h}, 1 \text{ kcal/h} = 1.16 \text{ W}$$

2-5 焦耳定律

(4) 1 公制冷凍噸 (1 RT) : 使 1 公噸 (1000 kg) 0°C 的冰, 在 24 小時內變為 0°C 的水時所吸收的熱量。(註: 冰的溶解熱為 79.68 kcal/kg。)

$$1 \text{ RT} = \frac{1000 \times 79.68}{24} = 3320 \text{ kcal/h} = 3.86 \text{ kW}$$

(5) 1 美 (英) 制冷凍噸 (1 U.S.RT) : 使 1 公噸 (2000 lb) 32°F 的冰, 在 24 小時內變為 32°F 的水時所吸收的熱量。(註: 冰的溶解熱為 144 BTU/lb。)

$$1 \text{ USRT} = \frac{2000 \times 144}{24} = 12000 \text{ BTU/h} = 3024 \text{ kcal/h} = 3.51 \text{ kW}$$

2. EER (能源效率比) : $EER = \frac{\text{冷氣能力 (kW)}}{\text{消耗電功率 (kW)}}$; EER 值愈高, 表示該冷氣機的冷氣效能愈好、愈省電; 一般窗型冷氣機 EER 值為 2.42, 分離式為 2.6, 變頻式則可達 3.37。

3. CSPF (冷氣季節性能因數) : $CSPF = \frac{\text{冷氣季節的總冷氣負載 (kW-h)}}{\text{冷氣季節的總消耗電量 (kW-h)}}$, 這是新版冷氣效能指標。