



電 阻

電阻是用來衡量帶電粒子在物質中移動所受阻力的程度，例如，當電子在導體中運動時，它會與導體內固定的質點（原子）發生碰撞，造成電子在行進時受阻；不同物質有不同的導電性質（可移動之電荷的受阻程度不同），也就是每種物質都有特定的電阻特性。本章將介紹電阻，這個電學中相當重要的學習項目之一。

學習目標

- ▶ 認識電阻與電導
- ▶ 判別電阻的色碼與各種類型的電阻
- ▶ 學習歐姆定律與焦耳定理
- ▶ 認識電阻與溫度的關係



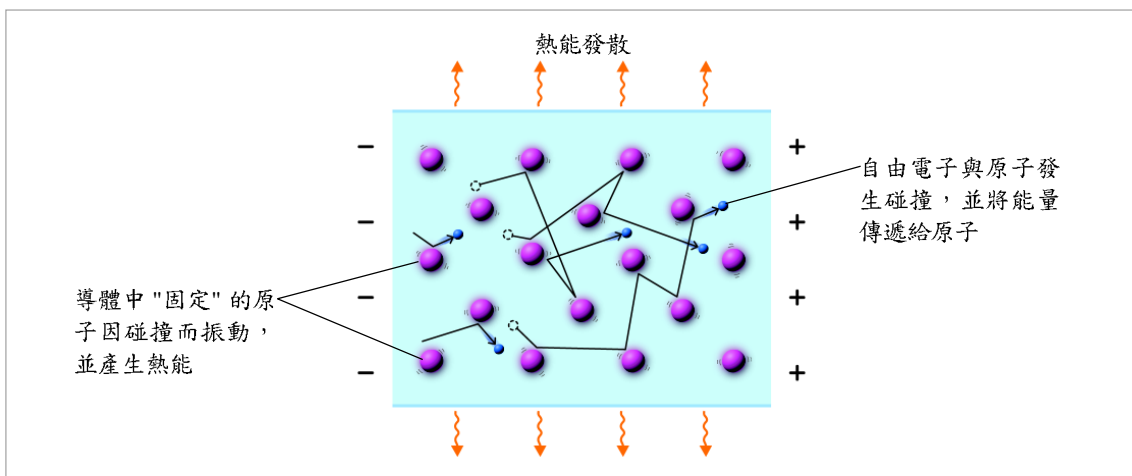
本章目錄

2-1	電阻與電導	44	2-4	歐姆定律	57
2-2	色碼電阻器	49	2-5	電阻溫度係數	61
2-3	常用電阻器	53	2-6	焦耳定律	66



2-1 電阻與電導

電阻（resistance）是指電荷在物體中移動時（電流）所受到的阻力。以導體為例，電子受電動勢的驅動而形成電（子）流，移動的電子會與導體中的原子碰撞，並將能量傳遞給導體，導體則以熱能的形式消耗電能，如圖 2-1 所示。不論何種導體，都或多或少有電阻的存在。



▲ 圖 2-1 導體中電子流的阻力 電子在導體中移動時，會與其中的原子發生碰撞而受到阻力，並將能量傳遞給導體而產生熱能。

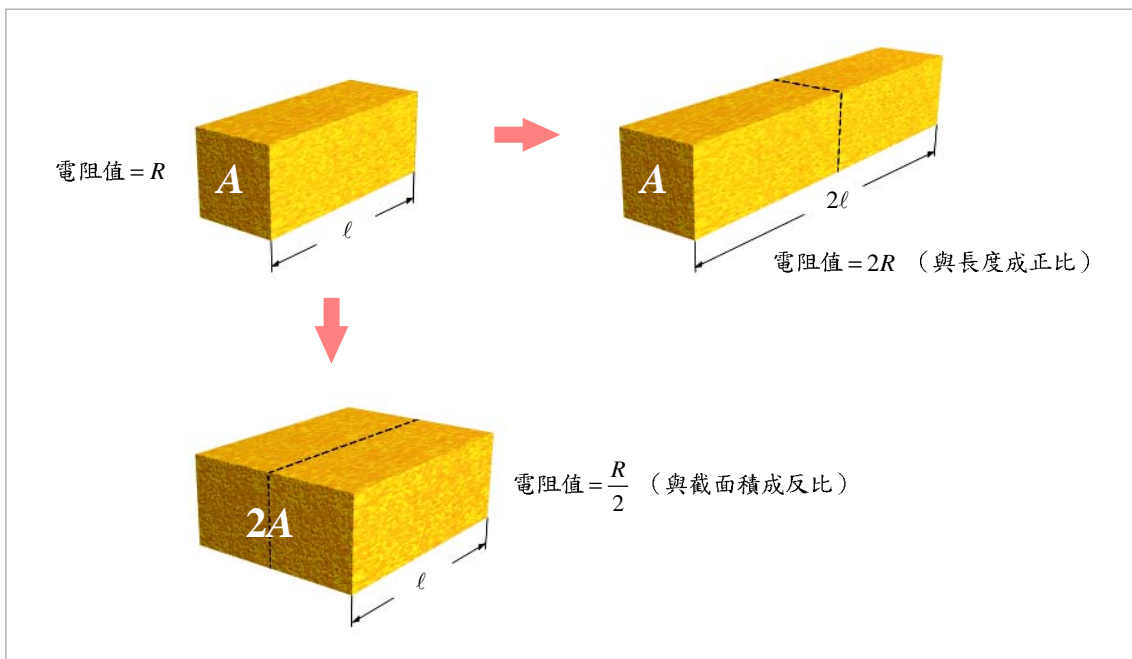
電導（conductance）是指物體傳導電流的能力，為電阻的倒數。當物體的電阻愈小，表示在物體中電流受到的阻力愈少，即導電能力愈好，電導愈大。

2-1.1 電阻與電阻係數

以水管為例子，當水管的長度愈長、或水管的截面積愈小時，則水流受到的阻力愈大、愈不易流過。導體的電阻也有類似的性質，根據研究：一導線的電阻值 R 與導線的長度 l 成正比，與導線的截面積 A 成反比，並與導線的材質及環境溫度有關，如圖 2-2 所示。在溫度不變的情況下，電阻值可以數學式表示為：

Σ 重要公式

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad [\Omega, \text{歐姆}] \quad (2-1-1)$$



▲ 圖 2-2 電阻值與導線長度、截面積的關係 電阻值大小與導線的長度成正比，與截面積成反比。

其中 ρ 為物質的電阻係數 (resistivity)，導體因材質的不同而會有不同的電阻係數。電阻的單位為歐姆 (ohm)，以希臘字母 Ω 表示。電阻公式中各參數的單位如表 2-1 所示，而表 2-2 則列出不同物質在溫度 20°C 時的電阻係數。

▼ 表 2-1 電阻公式中的單位

符號 單位	電阻值 R	長度 ℓ	截面積 A	電阻係數 ρ
MKS 制	歐姆 (Ω)	公尺 (m)	平方公尺 (m^2)	歐姆·公尺 ($\Omega \cdot \text{m}$)
CGS 制	歐姆 (Ω)	公分 (cm)	平方公分 (cm^2)	歐姆·公分 ($\Omega \cdot \text{cm}$)
FPS 制	歐姆 (Ω)	呎 (ft)	圓密爾 (cmil)	歐姆·圓密爾／呎 ($\Omega \cdot \text{cmil/ft}$)



▼ 表 2-2 不同物質在 20°C 時的電阻係數

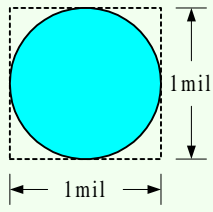
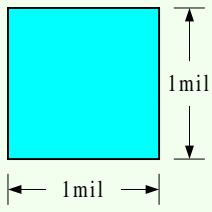
物質名稱	電阻係數 (Ω·m)	物質名稱	電阻係數 (Ω·m)
銀	1.59×10^{-8}	鎳鉻合金	150×10^{-8}
銻銅	1.724×10^{-8}	碳	3.5×10^{-5}
金	2.44×10^{-8}	鍺	0.46
鋁	2.82×10^{-8}	矽	640
鎢	5.6×10^{-8}	玻璃	$10^{10} \sim 10^{14}$
鐵	10×10^{-8}	琥珀	$10^{13} \sim 10^{16}$
白金	11×10^{-8}	硫磺	10^{15}
鉛	22×10^{-8}	石英	75×10^{16}



知識充電

密爾 (mil) 為長度單位，
1 密爾 = 0.001 吋。

圓密爾 (cmil) 為面積單位，
是以 1 密爾為直徑的圓面積。

單位名稱	圓密爾 (cmil)	平方密爾 (mil ²)
圖形		
單位換算	$1 \text{ cmil} = \frac{\pi}{4} \text{ mil}^2$ $1 \text{ mil}^2 = \frac{4}{\pi} \text{ cmil}$ $1 \text{ mil} = 0.001 \text{ in}$	

2-1.2 電導與電導係數

電導是用來衡量物質的導電能力，定義為**電阻的倒數**，單位為**姆歐** (mho，簡記為 \mathfrak{U})，或西門子 (Siemens，簡記為 S)，習慣上以英文字母 G 表示。我們將電導以數學式表示為：

Σ 重要公式

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{\rho \ell} A = \sigma \frac{A}{\ell} \quad [\mathfrak{U}, \text{ 姆歐 }] \quad (2-1-2)$$

其中 σ 為電導係數（conductivity），為電阻係數的倒數，在 MKS 制中的單位為 Ω/m 或 S/m 。

我們習慣使用百分率電導係數 $\sigma\%$ 來表示物質的導電特性，其定義為物體材質的電導係數 σ 與標準鉤銅電導係數 σ_s 的百分比，用數學式表示為：

Σ 重要公式

$$\sigma\% = \frac{\sigma}{\sigma_s} \times 100\% = \frac{\rho_s}{\rho} \times 100\% \quad (2-1-3)$$

由上式可知：標準鉤銅（ $\sigma_s = \frac{1}{\rho_s} = \frac{1}{1.724 \times 10^{-8}} = 5.80 \times 10^7 \text{ S}/\text{m}$ ）的百分率電導係數為 100%，而其它不同物質的百分率電導係數，則如表 2-3 所列。

▼ 表 2-3 各種材質的百分率電導係數

材質	百分率電導係數	材質	百分率電導係數
銀	105%	鎢	32%
標準鉤銅	100%	鐵	17.2%
金	71.6%	鋼	8.4%
鋁	61%	水銀	1.8%
矽鋼	45%	碳	0.04%



範例 2-1

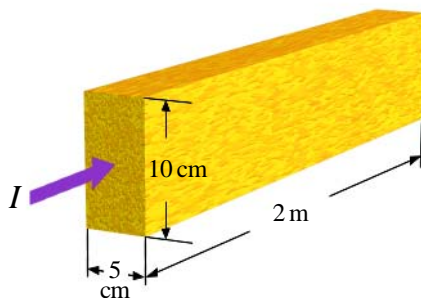
一導體長 2 公尺，寬 5 公分，高 10 公分，設其 $\rho = 2.8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，試求此材料之電阻值為多少？

【解】截面積 A 為電流垂流通過的區域

$$\begin{aligned} A &= 10\text{cm} \times 5\text{cm} \\ &= (10 \times 10^{-2}\text{m}) \times (5 \times 10^{-2}\text{m}) \\ &= 5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\ell = 2 \text{ m}$$

$$\therefore R = \rho \frac{\ell}{A} = (2.8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}) \frac{2\text{m}}{5 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 1.12 \times 10^{-5} \Omega$$





馬上練習 一導體長 8 公尺，截面積為 1 平方公釐，若電阻為 0.5 歐姆，則此材料的電阻係數為多少？

【答】 $\rho = 6.25 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。



範例 2-2

甲乙兩導體為相同材料製成，甲導體的長度為乙導體長度的四分之一，但甲導體的線徑為乙導體的二倍，若已知甲導體的電阻值為 10 歐姆，試求乙導體的電阻值為多少？

【解】由題意可知： $R_{\text{甲}} = \rho \frac{\ell_{\text{甲}}}{A_{\text{甲}}} = 10 \Omega$ ， $\ell_{\text{乙}} = 4\ell_{\text{甲}}$ ， $A_{\text{乙}} = \left(\frac{D_{\text{乙}}}{D_{\text{甲}}}\right)^2 A_{\text{甲}} = \frac{1}{4} A_{\text{甲}}$

($\because A = \frac{\pi}{4} D^2$ ， D ：導線線徑， A 與 D 平方成正比)

$$\therefore R_{\text{乙}} = \rho \frac{\ell_{\text{乙}}}{A_{\text{乙}}} = \rho \frac{4\ell_{\text{甲}}}{A_{\text{甲}}/4} = 16\rho \frac{\ell_{\text{甲}}}{A_{\text{甲}}} = 16 \times (10\Omega) = 160 \Omega$$

馬上練習 有一電阻值為 50 歐姆的導線，如果將導線均勻拉長至原來長度的 4 倍，若導線體積不變，試求導線的電阻值變為多少？

【答】 $R' = 800 \Omega$ 。



範例 2-3

有一導線，電阻係數為 $2.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，截面積 $A = 5 \text{ mm}^2$ ，長度 $\ell = 10 \text{ km}$ ，試求其電阻值與電導值各為多少？

【解】 $\ell = 10 \text{ km} = 10 \times 10^3 \text{ m}$ ， $A = 5 \text{ mm}^2 = 5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

$$(1) R = \rho \frac{\ell}{A} = (2.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}) \frac{10 \times 10^3 \text{ m}}{5 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 50 \Omega$$

$$(2) G = \frac{1}{R} = \frac{1}{50 \Omega} = 0.02 \text{ S}$$

馬上練習 有一導線，電導值為 50 S，截面積 $A = 7 \text{ mm}^2$ ，長度 $\ell = 5 \text{ m}$ ，試求此導線的電阻係數為多少？

【答】 $\rho = 2.8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。

**範例 2-4**

已知標準鋁銅之電阻係數 $\rho_s = 1.724 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，現有一材料其電阻係數 $\rho = 3.448 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，試求其百分率電導係數 $\sigma\%$ ？

$$\text{【解】 } \sigma\% = \frac{\sigma}{\sigma_s} \times 100\% = \frac{\rho_s}{\rho} \times 100\% = \frac{1.724 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}}{3.448 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}} \times 100\% = 50\%$$

馬上練習 已知銀的百分率電導係數為 105%，試求銀的電阻係數？

$$\text{【答】 } \rho = 1.64 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}。$$

**單元評量**

- 優良導體之材料，其電阻係數愈 _____；不良導體之材料，其電導係數愈 _____。（填大或小）
- 某電線均勻拉長 2 倍，電阻值應為原來的 _____ 倍。
- 百分率電導係數以 _____ 材料為準，其導電率為 100%。
- $R = 10\text{k}\Omega$ ， $G =$ _____ S。
- $G = 2\text{mS}$ ， $R =$ _____ Ω 。

2-2 色碼電阻器

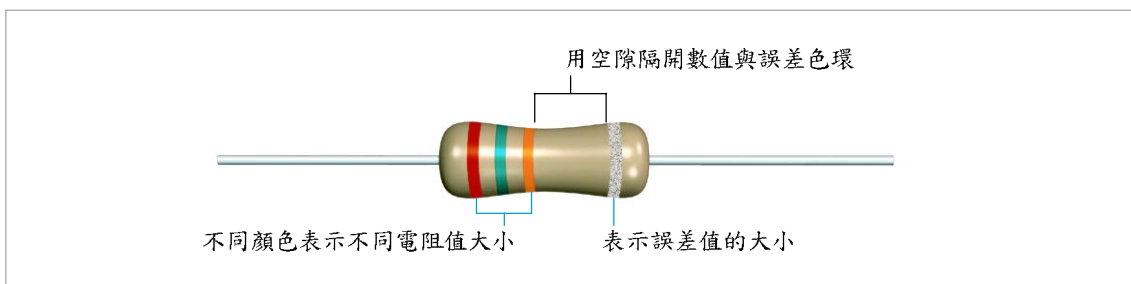
電阻器可用來限制或調整電路上的電流及電壓大小，其電阻值的標示方法有兩種：

- **數值表示法**：電阻值直接以數值標示在電阻器上，用於體積較大的固定型或可變型電阻器。
- **色碼表示法**：利用條狀色碼表示電阻器的電阻值，一般用於體積較小的碳質電阻器。



2-2.1 色碼的意義

一般色碼電阻器體積較小，若將文字印記在電阻器上，將不易辨識，因此利用環狀色帶的顏色標記來表示電阻值的大小，如圖 2-3 所示。根據美國電子工業協會（**Electronic Industries Association**，簡稱 EIA）訂定的標準，各顏色所代表的數值如表 2-4 所列。



▲ 圖 2-3 色碼電阻器 利用環狀色帶的顏色標記來表示電阻值的大小。

▼ 表 2-4 色碼電阻器中各種顏色所代表的數值

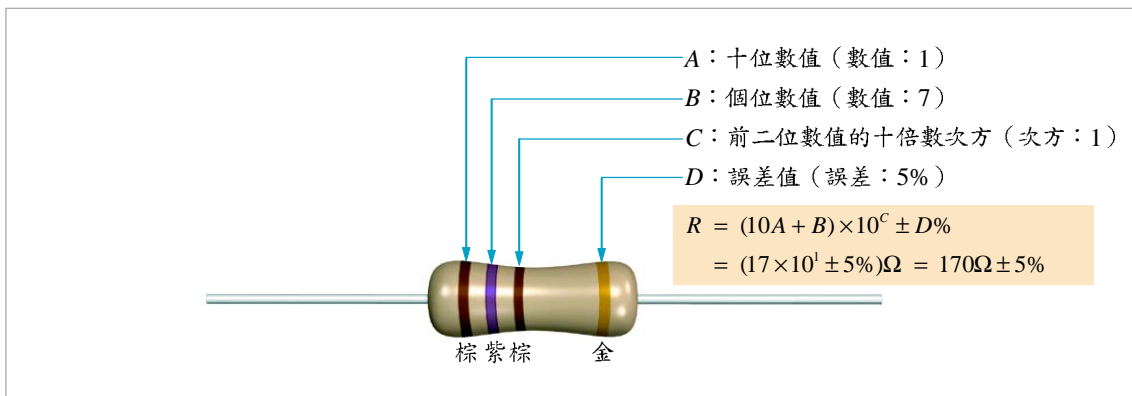
顏色	黑	棕	紅	橙	黃	綠	藍	紫	灰	白	金	銀	無
數值	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	--	--	--
幂次	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{-1}	10^{-2}	--
誤差	--	1%	2%	3%	4%	0.5%	0.25%	0.1%	0.05%	--	5%	10%	20%

2-2.2 色碼標示的辨別

解讀色碼電阻時，須將電阻器擺至正確方向。一般用途的電阻器誤差值約為 5%、10%、或 20%，分別以金色、銀色、與無色代表其色碼，解讀電阻器的色碼時，請將代表誤差的這側色碼環置於右側。如果電阻器的誤差值小於 5%，則辨識電阻置放方向的方法，會因製造廠商而有些不同：有些廠商習慣將代表誤差的色碼繪製在電阻器的一側，而與其它色碼有明顯的距離區隔，解讀時將其靠向右側即可；另一些廠商則將色碼連續繪製，而且將色碼偏向電阻器的某一側，解讀時應將其置於左側。至於解讀色碼各種顏色的意義與方法，分述如下。

四色碼電阻器

如圖 2-4 所示為一個四色碼的電阻器，其中色碼代表的意義為：

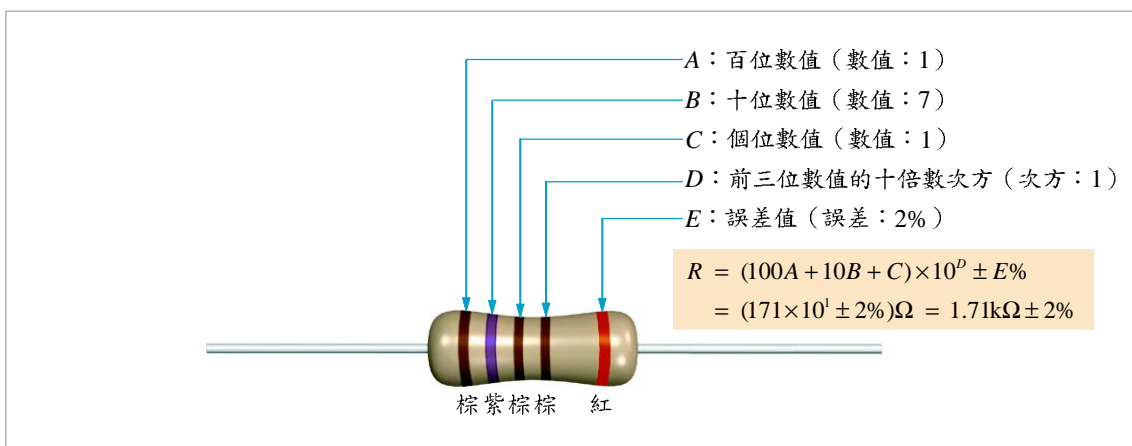


▲ 圖 2-4 四色碼電阻器 第一環代表十位數值；第二環代表個位數值；第三環代表前二位數值的十倍數次方；第四環代表誤差值。

四色碼電阻器為目前最普遍使用的電阻器，必須注意的是：若第四碼為無色，則成為三色碼電阻器，前三碼所代表的意義一樣，而誤差為 $\pm 20\%$ 。

五色碼電阻器

如圖 2-5 所示為一個五色碼的電阻器，其中色碼代表的意義為：



▲ 圖 2-5 五色碼電阻器 第一環代表百位數值；第二環代表十位數值；第三環代表個位數值；第四環代表前三位數值的十倍數次方；第五環代表誤差值。

五色碼電阻器為精密電阻器，誤差值較小，約在 2% 以下。



範例 2-5

試讀出下列各電阻值（四碼）：

- (1)  綠棕紅
(2)  紅紫橙 銀
(3)  棕黑金 金

【解】(1) $R = (51 \times 10^2 \pm 20\%) \Omega = 5.1 \text{ k}\Omega \pm 20\%$

(2) $R = (27 \times 10^3 \pm 10\%) \Omega = 27 \text{ k}\Omega \pm 10\%$

(3) $R = (10 \times 10^{-1} \pm 5\%) \Omega = 1 \Omega \pm 5\%$

馬上練習 有一四色碼電阻器的電阻值為 $35\Omega \pm 10\%$ ，則其色碼標示為何？

【答】橙綠黑銀。



範例 2-6

試讀出下列各電阻值（五碼）：

- (1)  紅紅紅紅 棕
(2)  紅棕黑金 綠
(3)  紅棕黑銀 紅

【解】(1) $R = (222 \times 10^2 \pm 1\%) \Omega = 22.2 \text{ k}\Omega \pm 1\%$

(2) $R = (210 \times 10^{-1} \pm 0.5\%) \Omega = 21 \Omega \pm 0.5\%$

(3) $R = (210 \times 10^{-2} \pm 2\%) \Omega = 2.1 \Omega \pm 2\%$

馬上練習 有一五色碼電阻器的電阻值為 $35\Omega \pm 1\%$ ，則其色碼標示為何？

【答】橙綠黑金棕。



單元評量



1. 下列各電阻，試依色碼讀出電阻值：

(1) 棕白黃 = _____ (2) 綠白藍金 = _____

(3) 黃橙綠金金 = _____ (4) 藍紫紅銀棕 = _____

2. 一電阻值為 $200\text{k}\Omega \pm 10\%$ ，則其容許之最大電阻值 = _____ Ω ，最小電阻值 = _____ Ω 。

2-3 常用電阻器

在電路中，常會使用到電阻器來控制電壓或調整電流的大小，常用的電阻器可分為兩大基本類型：固定電阻器（fixed value resistor）與可變電阻器（variable value resistor）。固定電阻器有一定大小的電阻值，且電阻值不能調整；而可變電阻器有一定範圍大小的電阻值，使用時可以控制、調整至某一個定值。

2-3.1 電阻器的規格

我們使用電阻器時，必須先瞭解其規格表示，才能在電路中安排適當的電阻器，否則電路中一旦放入規格不符的電阻器，可能電路沒有作用，或是導致電路燒毀引發更大的災害。一般用來表示電阻器的規格有：

- **電阻值**：阻止電荷自由移動的能力，單位為歐姆（ Ω ）。
- **額定功率**：電阻器在持續使用且不毀損的情況下所能耗散的最大功率，單位為瓦特（W）。
- **容許誤差**：以正負百分比（ $\pm\%$ ）表示誤差範圍。
- **構造材質**：如碳質、金屬膜、線繞電阻器等。
- **工作方式**：有固定式、可變式、半可變式等。

2-3.2 電阻器的種類

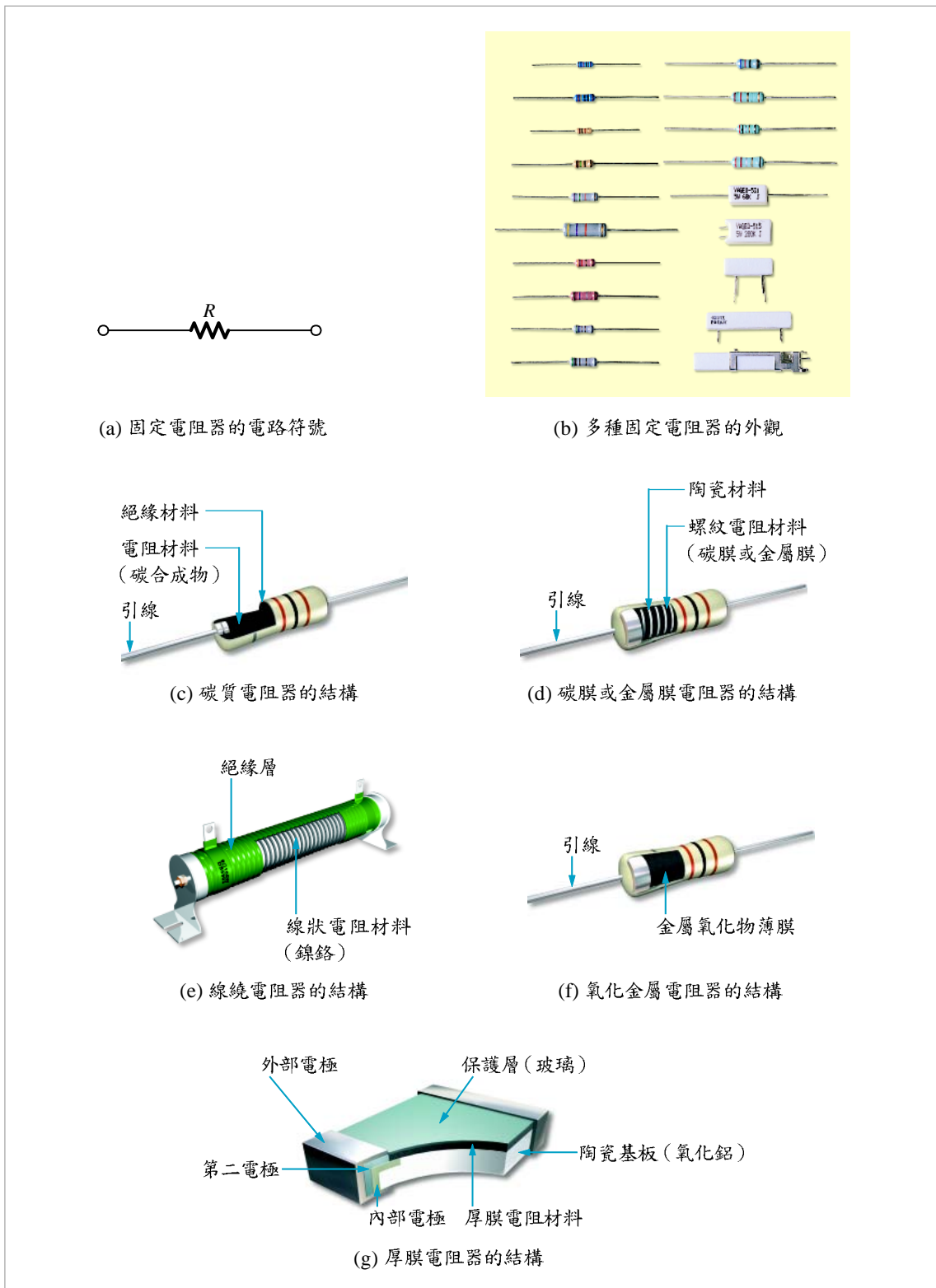
固定電阻器

固定電阻器在正常的工作範圍內，其電阻值保持不變，依製造的材料不同，可以區分為以下 7 種類型：



- **碳質電阻器 (carbon composition resistor)**：由碳粉混合絕緣填充物、並伴隨樹脂黏結劑熱壓膠合而成，按碳粉混合比例的差異可製作出不同的電阻值。
- **碳膜電阻器 (carbon film resistor)**：將碳沈積於陶瓷管上形成碳膜，並用機械切溝成螺狀紋，根據切溝的大小可製作出不同電阻值的電阻。相較於碳質電阻器，碳膜電阻器有較佳的誤差容許度 ($\pm 5\% \sim \pm 2\%$) 與溫度穩定性。
- **金屬膜電阻器 (metal film resistor)**：構造與碳膜電阻器類似，只是將碳膜改成金屬膜（常為鎳鉻金屬）。相較於碳膜電阻器，金屬膜電阻器又有更佳的誤差容許度 ($\pm 1\% \sim \pm 0.1\%$) 與溫度穩定性。
- **線繞電阻器 (wire-wound resistor)**：將電阻線（鎳鉻合金）纏繞在陶瓷管上，再以樹脂封裝，依據電阻線的長度大小可製作出不同的電阻值。其製作出來的電阻值較低 ($1\Omega \sim 150k\Omega$)，但具有較高的額定功率，且有良好的誤差容許度 ($\pm 1\%$)。
- **氧化金屬電阻器 (metal oxide resistor)**：將金屬氧化物鍍在絕緣材料上，其通常有較高的溫度穩定性。
- **厚膜電阻器 (thick film resistor)**：將金屬微粒與玻璃粉末製成的電阻皮膜附著於陶瓷基板（氧化鋁）上，其體積小，可做成晶片的形式。
- **水泥電阻器 (cement resistor)**：將線繞電阻器以特殊材質之不燃性耐熱水泥封裝，具有耐濕、耐熱、散熱佳、完全絕緣等優點。

圖 2-6 顯示固定電阻器之電路符號，及各種常見外觀與內部結構。



▲ 圖 2-6 固定電阻器之電路符號、常見外觀與內部結構



可變電阻器

可變電阻器（V.R.）在使用上可利用滑動或轉動的方式改變電阻值的大小。例如：利用可變電阻器調整收音機的聲音大小、或是檯燈的亮度。可變電阻器的兩個基本作用是**調整電流**與**分配電壓**。當可變電阻器用來調整電流時，只有兩個接點，這種電阻器又稱為**變阻器（rheostat）**；當用來分配電壓時，會有三個接點，其中兩端的電阻固定，另一端可調整，這種電阻器又稱為**電位計（potentiometer）**，如圖 2-7 所示。



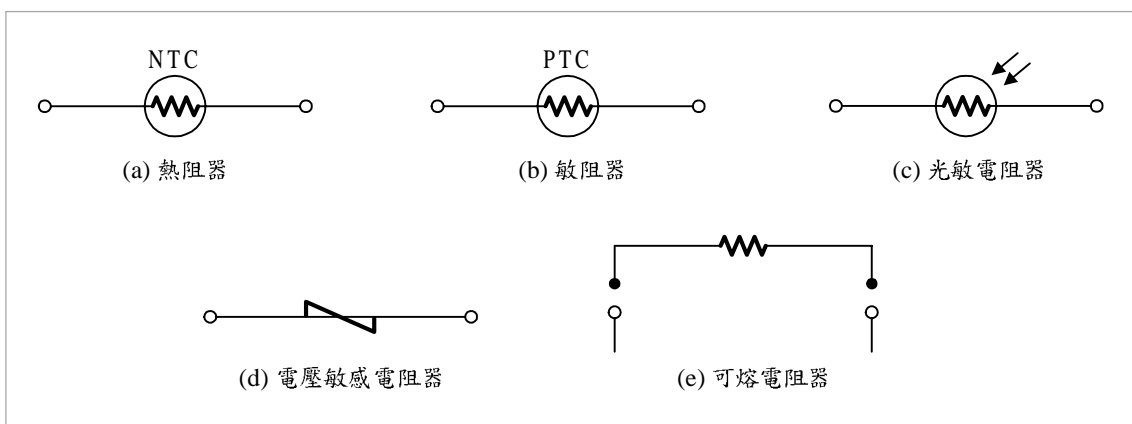
▲ 圖 2-7 可變電阻器的電路符號與常見外觀

半可變電阻器

半可變電阻器為可變電阻器的一種，但其電阻值的調整較為困難，需使用到螺絲起子或特殊工具，一般由工程人員或專業人員根據電路的需求進行調整，調整完即固定電阻值。半可變電阻器適用在精密通訊儀器、控制電路、或電路測量儀器中，以便改善固定電阻器所造成的電阻誤差。

特殊電阻器

- **熱阻器（thermistor）**：溫度上升，電阻值減小。
- **敏阻器（sensistor）**：溫度上升，電阻值增加。
- **光敏電阻器（photoresistor）**：光強度增加，電阻值減小。
- **電壓敏感電阻器（voltage sensitive resistor）**：電壓增加，電阻值減小。
- **可熔電阻器（fusible resistor）**：有固定電阻值，且具有保險絲的功能。



▲ 圖 2-8 各類特殊電阻器的電路符號

單元評量

1. 電阻器所能散逸之最大瓦特數，稱為電阻器之 _____。
2. 當溫度升高而電阻值增加的特殊電阻器稱為 _____。
3. 當溫度升高而電阻值減少的特殊電阻器稱為 _____。
4. 利用光來改變電阻值的特殊電阻器稱為 _____。

2-4 歐姆定律

歐姆定律（Ohm's law）是電學中最基本的定律，這是實驗上的經驗公式，一般的導線材質的電阻特性都符合歐姆定律。

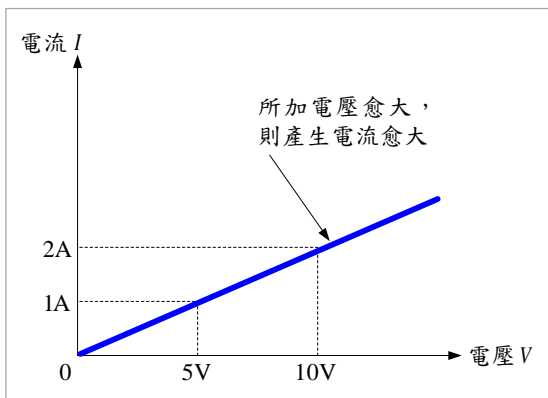
2-4.1 歐姆定律

西元 1826 年，德國物理學家歐姆（G. S. Ohm, 1787~1854）實驗發現：許多物質，包含大部分的金屬材料所製成的元件，**在同一溫度下，元件的電壓與電流呈線性關係**，即電壓與電流間的比值為一常數（電阻值）。

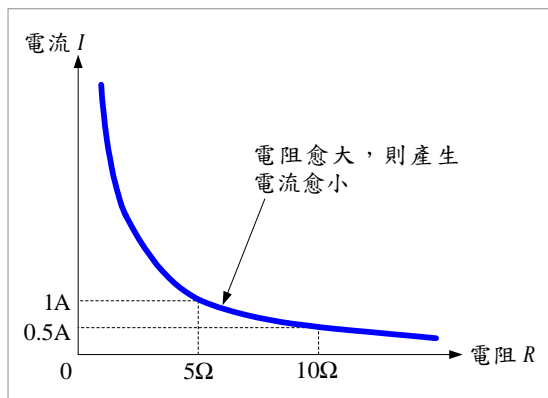


我們可以用實驗的角度陳述歐姆定律為：

- 在相同的電阻條件下，电路中的**電流大小與所加的電壓值成正比**，如圖 2-9 所示。
- 在不改變電壓大小的情況下，电路中的**電流大小與電阻值成反比**，如圖 2-10 所示。



▲ 圖 2-9 電阻相同時的電壓 - 電流關係圖



▲ 圖 2-10 電壓不變時的電阻 - 電流關係圖

利用數學式，我們可以將歐姆定律表示成：

Σ 重要公式

$$V = IR \quad [V, \text{伏特}] \quad (2-4-1)$$

(2-4-1)式即為著名的**歐姆定律**，其中 V 為電阻器兩端的電位差，單位為伏特（V）； I 為通過電阻器的電流，單位為安培（A）； R 為電阻器的電阻值，單位為歐姆（ Ω ）。

所以，只要我們知道電路中的電壓與電流值，便可以將電阻值表示為：

Σ 重要公式

$$R = \frac{V}{I} \quad [\Omega, \text{歐姆}] \quad (2-4-2)$$

或者，當電壓與電阻為已知，可以將電流表示成：

Σ 重要公式

$$I = \frac{V}{R} \quad [A, \text{安培}] \quad (2-4-3)$$

2-4.2 電功率

我們曾在 1-7 節中介紹過電功率的定義： $P = IV$ ，則根據上述的歐姆定律，若有一電阻器在電壓與電阻已知的情況下，利用(2-4-3)式，可以將電功率表示為：

Σ 重要公式

$$P = IV = \frac{V}{R} \cdot V = \frac{V^2}{R} \quad [\text{W, 瓦特}] \quad (2-4-4)$$

若在電流與電阻已知的情況下，利用(2-4-1)式，可以將電功率表示為：

Σ 重要公式

$$P = IV = I \cdot IR = I^2 R \quad [\text{W, 瓦特}] \quad (2-4-5)$$



範例 2-7

在電路中，電阻器兩端電壓為 10 伏特，試求當電阻值為：(1) 4Ω (2) $2\text{k}\Omega$ 時之電流值？

【解】(1) $I = \frac{V}{R} = \frac{10\text{V}}{4\Omega} = 2.5\text{ A}$

(2) $I = \frac{V}{R} = \frac{10\text{V}}{2\text{k}\Omega} = 5\text{ mA}$

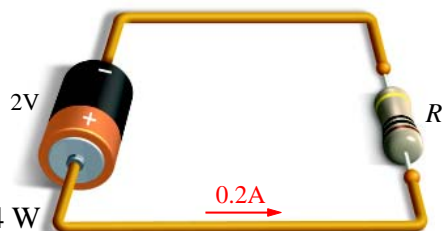


範例 2-8

如右圖所示，試求：(1) R 電阻器之電阻值為多少？(2) 電阻器消耗之電功率為多少？

【解】(1) $R = \frac{V}{I} = \frac{2\text{V}}{0.2\text{A}} = 10\Omega$

(2) $P = VI = I^2 R = (0.2\text{A})^2 (10\Omega) = 0.4\text{ W}$





馬上練習 10 伏特之電源兩端接有 20 歐姆電阻一個，試求：(1) 電路之電流為多少？
(2) 電阻器消耗之電功率為多少？

【答】(1) $I = 0.5 \text{ A}$; (2) $P = 5 \text{ W}$ 。



範例 2-9

100 瓦特之燈泡接於 100 伏特之電源，試求：(1) 燈泡所流過之電流為多少？ (2) 燈泡的電阻為若干？

【解】(1) $I = \frac{P}{V} = \frac{100\text{W}}{100\text{V}} = 1 \text{ A}$

(2) $R = \frac{V}{I} = \frac{100\text{V}}{1\text{A}} = 100 \Omega$

馬上練習 50W 之電燈泡兩端接有電壓源，今以電表測得通過燈泡之電流為 0.5A，
試求：(1) 電壓源之電壓值為多少？ (2) 燈泡之電阻值為多少？

【答】(1) $V = 100 \text{ V}$; (2) $R = 200 \Omega$ 。



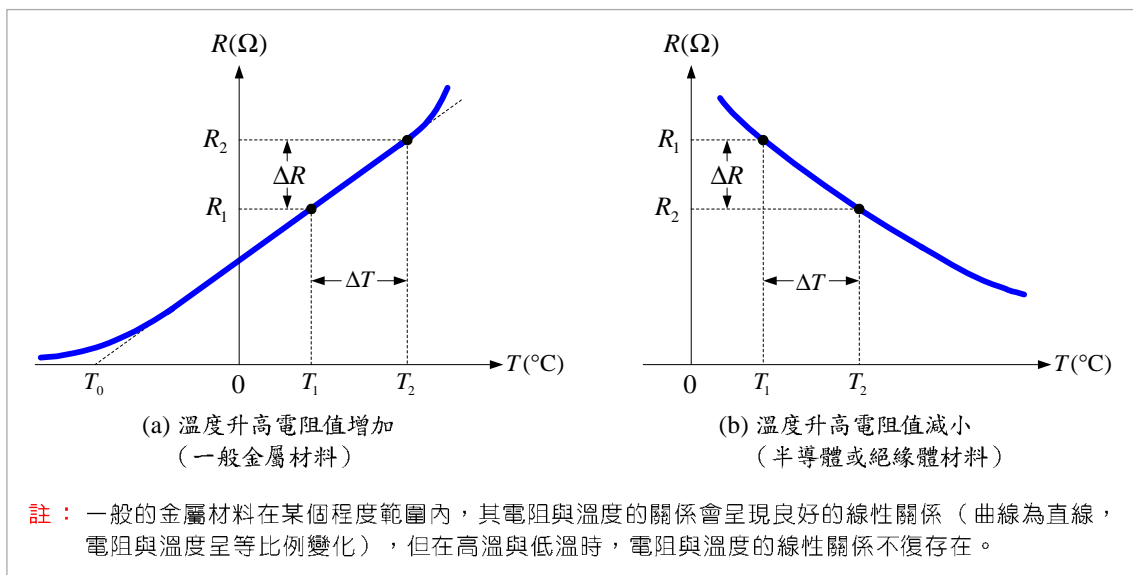
單元評量



1. 歐姆定律的公式為 $V = \underline{\hspace{2cm}}$, $I = \underline{\hspace{2cm}}$, $R = \underline{\hspace{2cm}}$ 。
2. 在一電路中，若電阻器兩端的電壓為 6V，且通過的電流為 2mA，則此電阻器的電阻值為 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。
3. 有一 8Ω 的電阻器，若其通過的電流為 20mA，則此電阻器兩端的電壓為 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。
4. 20 歐姆之電阻通過 5 安培電流時，所消耗的電功率為 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。
5. 有一 $10\text{k}\Omega$ 、1W 的電阻器，其使用的電壓最高不得超過 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。
6. 1A 的電流通過 1Ω 的電阻器，產生的功率為 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。
7. 承上題，如果電流增加為原來的 10 倍，則功率變為原來的 $\underline{\hspace{2cm}}$ 倍。

2-5 電阻溫度係數

在 2-1 節中曾介紹電阻的大小與物體的長度、截面積和電阻係數有關，不過電阻值也會因為工作環境溫度的變化而改變。一般的金屬材料，其電阻值會因溫度升高而增加；半導體或絕緣體材料則會因溫度增加而電阻值減小，如圖 2-11 所示。



▲ 圖 2-11 電阻與溫度的關係 一般金屬材料的電阻值隨溫度升高而增加；半導體或絕緣體材料的電阻值則隨溫度升高而減小。

2-5.1 電阻溫度係數的定義

電阻溫度係數（temperature coefficient of resistance）是用來描述電阻值隨溫度變化的程度，定義為單位溫度的電阻變化量與原來電阻值的比值，用數學式表示成：

Σ 重要公式

$$\alpha_1 = \frac{\frac{\Delta R}{\Delta T}}{R_1} = \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} \cdot \frac{1}{R_1} \quad \left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \text{ 或 } ^\circ\text{C}^{-1} \right] \quad (2-5-1)$$



由上式可整理得：

Σ 重要公式

$$R_2 = R_1[1 + \alpha_1(T_2 - T_1)] \quad [\Omega, \text{歐姆}] \quad (2-5-2)$$

其中， R_1 為溫度 T_1 時的電阻值； R_2 為溫度 T_2 時的電阻值； α_1 為溫度 T_1 時的電阻溫度係數。

如果電阻值隨溫度的升高而增加（圖 2-11(a)），則這種溫度係數稱為正電阻溫度係數（positive temperature coefficient of resistance），如金屬導體的電阻特性；如果電阻值隨溫度的升高而減小（圖 2-11(b)），則這種溫度係數稱為負電阻溫度係數（negative temperature coefficient of resistance），如某些陶瓷材質及半導體之電阻器的特性。表 2-5 列出不同金屬材質在 0°C 及 20°C 時之電阻器的溫度係數。

▼ 表 2-5 常用金屬導體在 0°C 及 20°C 時的電阻溫度係數

材料	0°C 時的電阻溫度係數 (α_0)	20°C 時的電阻溫度係數 (α_{20})
銀	0.00412	0.00380
軟銅	0.00427	0.00393
金	0.00370	0.00340
鋁	0.00427	0.00391
鎢	0.00495	0.00450
鐵	0.00556	0.00500
鋅	0.00400	0.00370
鎳鉻	0.00016	0.00016

2-5.2 電阻與溫度的關係

不同溫度時的電阻比較

如果在 0°C 時的電阻溫度係數為 α_0 ，電阻值為 R_0 ，利用(2-5-2)式可將電阻 R_1 、 R_2 分別表示成：

$$R_1 = R_0[1 + \alpha_0(T_1 - 0)] = R_0(1 + \alpha_0 T_1) \quad (2-5-3a)$$

$$R_2 = R_0[1 + \alpha_0(T_2 - 0)] = R_0(1 + \alpha_0 T_2) \quad (2-5-3b)$$

將以上二式相除可得：

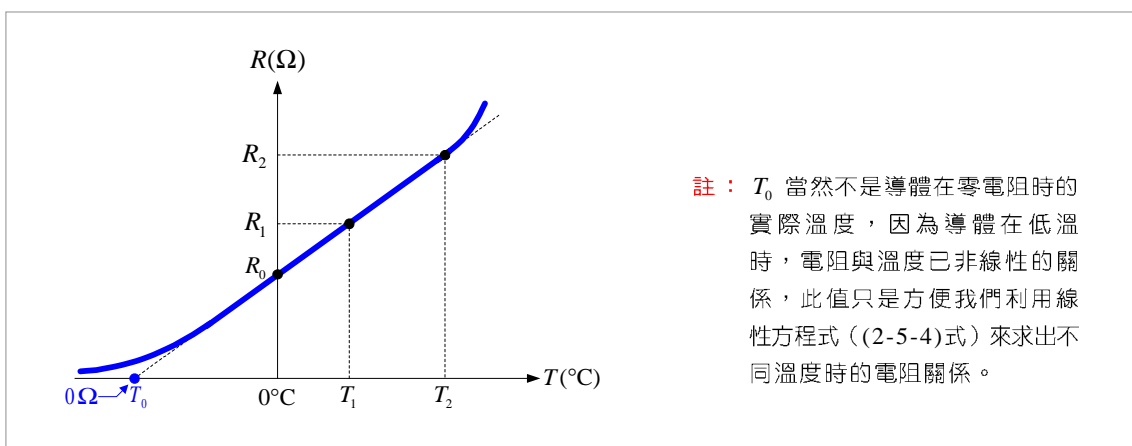
Σ 重要公式

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_0(1 + \alpha_0 T_2)}{R_0(1 + \alpha_0 T_1)} = \frac{\frac{1}{\alpha_0} + T_2}{\frac{1}{\alpha_0} + T_1} \quad (2-5-4)$$

上式告訴我們電阻 R_1 、 R_2 的關係，可用所處溫度 T_1 、 T_2 及一常數 $\frac{1}{\alpha_0}$ （ α_0 為 0°C 時的電阻溫度係數）來表示。

推論絕對溫度

對於金屬導體而言，在某個溫度範圍內電阻值隨溫度變化呈線性關係，因此，存在一個理想的溫度 T_0 ，將使得導體的電阻值為零，我們稱 T_0 為零電阻的推論絕對溫度（inferred absolute temperature），如圖 2-12 所示。



▲ 圖 2-12 推論絕對溫度的圖示 根據電阻 R_0 、 R_1 、 R_2 在不同溫度 0°C 、 T_1 、 T_2 下的線性關係，可推得零電阻時的溫度 T_0 。

將溫度 T_0 時的零電阻代入 (2-5-3) 式，可得：



Σ 重要公式

$$0 = R_0[1 + \alpha_0(T_0 - 0)] = R_0(1 + \alpha_0 T_0)$$

$$\Rightarrow 1 + \alpha_0 T_0 = 0 \Rightarrow T_0 = -\frac{1}{\alpha_0}$$

所以(2-5-4)式可重新表示為：

Σ 重要公式

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{\frac{1}{\alpha_0} + T_2}{\frac{1}{\alpha_0} + T_1} = \frac{|T_0| + T_2}{|T_0| + T_1} \quad (2-5-5)$$

當然， T_0 只是一個理論計算的假設值，實際在此極低溫度的情況下，導體的電阻值並不為零。表 2-6 是幾個常用金屬導體的推論絕對溫度。

一般導線皆以銅線為材料，銅線的推論絕對溫度為 -234.5°C ，所以(2-5-5)式便可以表示成：

▼ 表 2-6 常用金屬導體零電阻的推論絕對溫度

材料	推論絕對溫度 T_0 °C
銀	- 243
鎢	- 204
銅	- 234.5
鎳	- 147
金	- 274
鐵	- 180
鋁	- 236
鎳鉻合金	- 2250

Σ 重要公式

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{234.5 + T_2}{234.5 + T_1} \quad (2-5-6)$$

任意溫度時的電阻溫度係數

電阻溫度係數並非一個固定值，它會隨溫度變化而改變。將推論絕對溫度 T_0 時的零電阻代入(2-5-2)式，可得：

$$0 = R_1[1 + \alpha_1(T_0 - T_1)] \Rightarrow 1 + \alpha_1(T_0 - T_1) = 0$$

所以溫度 T_1 時（任意溫度 T ）的電阻溫度係數與 0°C 時的關係為：

Σ 重要公式

$$\alpha_1 = \frac{1}{-T_0 + T_1} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + T_1} = \frac{\alpha_0}{1 + \alpha_0 T_1} \Rightarrow \alpha_T = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + T}$$



範例 2-10

有一鐵質導體在 20°C 時的電阻溫度係數為 0.005°C^{-1} ，電阻值為 $40\ \Omega$ ，試求此鐵質導體在 80°C 時的電阻值為多少？

【解】依題意，利用(2-5-2)式得：

$$R_2 = R_1[1 + \alpha_1(T_2 - T_1)] = (40\Omega)[1 + 0.005(80 - 20)] = 52\ \Omega$$

馬上練習

某物體在 20°C 時為 $30\ \Omega$ ，若溫度上升至 80°C 時為 $50\ \Omega$ ，試求 α_{20} （ 20°C 時之電阻溫度係數）為多少？

【答】 $\alpha_{20} = 0.011^\circ\text{C}^{-1}$ 。



範例 2-11

有一馬達線圈在為 15.5°C 時的電阻值為 $50\ \Omega$ ，試求其在 65.5°C 時的電阻值為多少？

【解】 \because 馬達線圈係由銅線製成 $\therefore |T_0| = 234.5^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} \frac{R_2}{R_1} &= \frac{|T_0| + T_2}{|T_0| + T_1} = \frac{234.5^\circ\text{C} + T_2}{234.5^\circ\text{C} + T_1} \\ \Rightarrow R_2 &= (50\Omega) \frac{234.5^\circ\text{C} + 65.5^\circ\text{C}}{234.5^\circ\text{C} + 15.5^\circ\text{C}} = (50\Omega) \frac{300^\circ\text{C}}{250^\circ\text{C}} = 60\ \Omega \end{aligned}$$

馬上練習

由銅線繞成的線圈在 17.5°C 時電阻為 $60\ \Omega$ ，通電後溫度升高，而電阻變為 $70\ \Omega$ ，試問溫度升高幾度？

【答】 $\Delta T = 42^\circ\text{C}$ 。



範例 2-12

鐵在 0°C 時的電阻溫度係數為 $0.00556^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，試求其 20°C 時的電阻溫度係數為多少？

$$\text{【解】 } \alpha_{20} = \frac{\alpha_0}{1 + \alpha_0 T_1} = \frac{0.00556^{\circ}\text{C}^{-1}}{1 + 0.00556 \times 20} = \frac{0.00556^{\circ}\text{C}^{-1}}{1.1112} = 0.005^{\circ}\text{C}^{-1}$$

馬上練習 承範例 2-10 之馬上練習，試求 α_0 (0°C 時之電阻溫度係數) 為多少？

$$\text{【答】 } \alpha_0 = 0.0143^{\circ}\text{C}^{-1}。$$



單元評量



1. 金屬導體之電阻值會隨溫度升高而 _____，而其電阻溫度係數會隨溫度升高而 _____。
2. 半導體及絕緣體等非金屬性材料之電阻值會隨溫度升高而 _____，而其電阻溫度係數會隨溫度升高而 _____。
3. 負電阻溫度係數的材料，當溫度愈高時，其電阻值會 _____。
4. 銅在 0°C 時的電阻溫度係數為 $0.00427^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，若一銅線電阻在 0°C 時的電阻值為 30Ω ，試求此銅線在 50°C 時的電阻值為 _____ Ω 。
5. 一銅線電阻在 20°C 時的電阻值為 600Ω ，試求此銅線在 60°C 時的電阻值為 _____ Ω 。

2-6 焦耳定律

電阻是電子在導體中移動時所遭遇的阻力，電能也會因電子受阻力而轉換成熱能，這種現象稱為**電流的熱效應**。

2-6.1 電流熱效應實驗

英國科學家焦耳（James P. Joule, 1818~1889）對電流的熱效應作了兩項實驗，分別為：

● 實驗一

對不同材質的導體通以相等的電流，發現電阻較大的導體會有較高的熱量產生，且通電時間愈長產生的熱量愈高，即 $H \propto R \cdot t$ 。

● 實驗二

對相同材質的導體通以不相等的電流，發現較大電流通過導體所產生的熱量，遠大於較小電流通過導體所產生的熱量，而且發現產生的熱量與通過電流的平方成正比，即 $H \propto I^2$ 。

● 結論

綜合以上兩項實驗，焦耳於 1840 年提出實驗結論：**電流通過導體時所產生的熱量 H ，與通過電流 I 的平方、導體的電阻值 R 及通過的時間 t 成正比，即 $H \propto I^2 R t$** 。這個結論就是所謂的焦耳定律（Joule's law）。

2-6.2 焦耳定律公式

由焦耳熱效應實驗得到的結論，可以用數學式將焦耳定律表示成：

$$H = K \cdot I^2 R t \quad (2-6-1)$$

其中 K 為正比的常數，其值隨著選用單位的差異而有所不同。如果熱量 H 的單位為焦耳，則上式中的常數 $K=1$ ，(2-6-1) 式變為：

Σ 重要公式

$$H = Pt = I^2 R t \quad [J, \text{焦耳}] \quad (2-6-2)$$

其中 I 的單位為安培（A）， R 的單位為歐姆（ Ω ）， t 的單位為秒（s）。



熱量的單位在公制中除了使用焦耳之外，一般也習慣以卡路里（calorie）簡稱卡（cal）為單位；1卡為使1克的水升高溫度1°C所需的熱量。若改以卡為熱量 H 的單位，則(2-6-2)式可改寫成：

Σ 重要公式

$$H = 0.24Pt = 0.24I^2Rt \quad [\text{cal}, \text{卡}] \quad (2-6-3)$$

另外，英制中的熱量單位為英熱單位（British thermal unit，簡記為 Btu）；1Btu 為使1磅的水升高溫度1°F所需的熱量。焦耳定律公式的單位轉換與比例常數的關係如表 2-7 所示。

▼ 表 2-7 不同單位的焦耳定律公式

公制	英制
$H = I^2Rt = \frac{V^2}{R}t \quad [\text{J}]$ $= 0.24I^2Rt = 0.24\frac{V^2}{R}t \quad [\text{cal}]$	$H = \left(\frac{1}{1055}\right)I^2Rt = \left(\frac{1}{1055}\right)\frac{V^2}{R}t \quad [\text{Btu}]$
$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J} \approx 4.2 \text{ J}$ $1 \text{ J} = 0.239 \text{ cal} \approx 0.24 \text{ cal}$	$1 \text{ Btu} = 778 \text{ ft} \cdot \text{lb}$ $= 252 \text{ cal} = 1055 \text{ J}$



知識充電

由焦耳定律： $H = I^2Rt = Pt = W$ ，可看出熱量與功都是一種能量。我們將一單位的熱量相當於多少的功或能量稱為熱功當量（heat equivalent of work），其比值即為 4.186 焦耳／卡。



範例 2-13

有一電爐的電阻為 100 歐姆，通過的電流為 1.5 安培，若使用 3 分鐘，產生的熱量為多少焦耳？多少卡？

【解】(1) $H = I^2Rt = (1.5\text{A})^2(100\Omega)(3 \times 60\text{s}) = 40500 \text{ J}$

(2) $H = 0.24I^2Rt = 0.24(1.5\text{A})^2(100\Omega)(3 \times 60\text{s}) = 9720 \text{ cal}$

馬上練習 有一電爐的電阻為 50 歐姆，若使用 10 分鐘，所產生的熱量為 28800 卡，試求通過的電流為多少？

【答】 $I = 2 \text{ A}$ 。



範例 2-14

有一電熱水器，內裝 5 公升 20°C 的水，其電阻為 16 歐姆，若外接 100 伏特的電源，使用 10 分鐘，試求電熱水器產生的熱量為多少卡？水溫上升多少 $^\circ\text{C}$ ？

【解】(1) $H = 0.24 \frac{V^2}{R} t = 0.24 \frac{(100\text{V})^2}{16\Omega} (10 \times 60\text{s}) = 90000 \text{ cal}$

(2) 1 克的水上升 1°C 所需的熱量為 1 卡，則 m 克的水上升 ΔT $^\circ\text{C}$ 所需的熱量為：

$$H = ms\Delta T = m\Delta T \quad (\text{其中 } s \text{ 為水的比熱，} s = 1 \text{ 卡/克 } ^\circ\text{C})$$

$$\therefore \Delta T = \frac{H}{m} = \frac{90000 \text{ cal}}{5 \times 10^3 \text{ g}} = 18^\circ\text{C} \quad (1 \text{ 公升的水相當於 } 1000 \text{ 公克})$$

馬上練習 有一電熱水器的電阻為 30 歐姆，通上電源後使用 5 分鐘，若所產生的熱量為 10^5 焦耳，試求外接的電源為多少伏特？

【答】 $V = 100 \text{ V}$ 。



單元評量



1. 每產生一單位熱量所需之能量或功者，稱之為 _____。
2. $1 \text{ cal} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ J}$ ， $1 \text{ Btu} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ J}$ 。
3. 電阻器產生之熱量與電阻值成 _____ 比，與流經電阻器之電流大小成 _____ 比。
4. 在同一額定電壓下，電爐的電熱線經若去一部份後，則電爐產生之熱量將會 _____（增加或減少）。
5. 有一 10Ω 電阻器，以 10A 的電流通過 10 分鐘後，則該電阻器所產生的熱量為 _____ 仟卡。



重點摘要

1. 電阻是電子在導體中移動時所遭遇的阻力；電導是物質導電的程度。物質依導電程度的不同，可分成導體、半導體與絕緣體。
2. 電阻值的大小與導線的長度 ℓ 成正比，而與導線的截面積 A 成反比，用數學式表示為：

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad [\Omega, \text{歐姆}]$$

3. 電導是物質導電的能力，以數學式表示為：

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{\rho} \frac{A}{\ell} = \sigma \frac{A}{\ell} \quad [\mathfrak{U}, \text{姆歐}]$$

4. 百分率電導係數 $\sigma\%$ 為物體材質的電導係數 σ 與標準鉚銅電導係數 σ_s 的百分比，用數學式表示為：
$$\sigma\% = \frac{\sigma}{\sigma_s} \times 100\%$$

5. 歐姆定律：

- (1) 在相同的電阻條件下，電路中的電流大小與所加的電壓值成正比。
- (2) 在不改變電壓大小的情況下，電路中的電流大小與電阻值成反比。
- (3) 利用數學式表示成：
$$V = IR$$

6. 電功率可以表示為：

$$P = IV = \frac{V^2}{R} = I^2 R \quad [\text{W}, \text{瓦特}]$$

7. 電阻溫度係數是用來描述電阻值隨溫度變化的程度，定義為單位溫度的電阻變化量與原來電阻值的比值，電阻隨溫度變化的情形為：

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha_1 (T_2 - T_1)] \quad [\Omega, \text{歐姆}]$$

8. 焦耳定律：電流通過導體時所產生的熱量 H ，與通過電流 I 的平方、導體的電阻值 R 及通過的時間 t 成正比。以數學式表示成：

$$\begin{aligned} H &= Pt = I^2 Rt && [\text{焦耳}] \\ &= 0.24 I^2 Rt && [\text{卡}] \\ &= \frac{1}{1055} I^2 Rt && [\text{Btu}] \end{aligned}$$

9. 熱功當量：每產生一單位熱量所需的能量或功。
10. 1卡的熱量是使1公克的水升高溫度 1°C 所需的熱量。



學後評量

一、選擇題

- () 1. 下列何種材料的導電率定義為 100% (A)純銀 (B)純銅 (C)標準鉻銅 (D)純鋁
- () 2. 電阻若為 $120 \pm 5\%$ 歐姆，則其色碼順序為 (A)黑棕黑金 (B)黑棕黑銀 (C)棕紅棕金 (D)棕紅棕銀
- () 3. 有一色碼電阻的色環顏色，依序為橙、橙、紅、金，則其電阻為：(A) $3300\Omega \pm 5\%$ (B) $2200\Omega \pm 5\%$ (C) $3200\Omega \pm 5\%$ (D) $2300\Omega \pm 5\%$
- () 4. 有一 $2k\Omega$ 電阻器和電池連接後，有 $6mA$ 電流流過，若電池現和 600Ω 電阻器連接，則此電阻器上流過的電流為 (A) $60mA$ (B) $40mA$ (C) $20mA$ (D) $10mA$
- () 5. 某電阻器色碼為棕、黑、紅、銀，則該電阻可能之最大電阻值為 (A) 900Ω (B) 1000Ω (C) 1100Ω (D) 1200Ω
- () 6. $110V$ 、 $100W$ 的燈泡接於 $100V$ 的電源，若燈泡的電阻不變，則功率變為 (A) $72.6W$ (B) $78.2W$ (C) $82.6W$ (D) $100W$
- () 7. 額定 $110V$ 、 $110W$ 的燈泡，如不慎接上 $220V$ 電源，則該燈泡產生的熱量為正常的 (A)4 倍 (B)2 倍 (C)10 倍 (D)100 倍
- () 8. 有四個燈泡 $10W$ 、 $20W$ 、 $40W$ 及 $60W$ 額定電壓皆是 $110V$ ，則哪一個燈泡電阻最大？(A) $10W$ (B) $20W$ (C) $40W$ (D) $60W$
- () 9. A、B 兩銅線，A 長為 100 公分，截面積為 4 平方公分；B 長為 200 公分，截面積為 2 平方公分；則 A、B 銅線電阻值的比為 (A)1:2 (B)1:1 (C)4:1 (D)1:4
- () 10. 等重量的標準鉻銅兩份，以相同的製造程序分別製成長度為 a 公尺與 $4a$ 公尺的均勻銅線，則前者與後者電阻值之比為 (A)4:1 (B)1:4 (C)1:16 (D)1:1
- () 11. 物質的電阻值會隨溫度的升高而 (A)增加 (B)減少 (C)不變 (D)無法確定
- () 12. 以下幾種金屬，何者的電阻係數最小？(A)金 (B)銀 (C)銅 (D)鋁
- () 13. 長度、截面積相等的兩條導線，在相同溫度下，電阻係數較大的導線，其電阻值 (A)較大 (B)較小 (C)相等 (D)無法比較





- ()14. 如果要將一條導線的電阻值變為原來的一半，且導線的材料與長度保持不變，則導線的 (A)直徑為原來的 2 倍 (B)直徑為原來的 $1/2$ 倍 (C)截面積為原來的 2 倍 (D)截面積為原來的 $1/2$ 倍
- ()15. 有 A、B 兩導線以相同材料製成，兩導線的長度相同，但 A 導線的截面積為 B 導線的 2 倍，如果 B 導線的電阻為 20Ω ，則 A 導線的電阻為 (A) 10Ω (B) 20Ω (C) 40Ω (D) 5Ω
- ()16. 有一段 2 公尺的導線，其總電阻為 2Ω ，則其電導為 (A)2 姆歐 (B)4 姆歐 (C)1 姆歐 (D) $1/2$ 姆歐
- ()17. 有一電阻值為 50Ω 的導線，將導線拉長且導線不斷裂，使導線的直徑變為原來的一半，則導線的電阻值變為 (A) 20Ω (B) 40Ω (C) 800Ω (D) 600Ω
- ()18. 在 0°C 時，有一銅導線的電阻溫度係數為 $0.00427^\circ\text{C}^{-1}$ ，則當溫度升高為 20°C 時，電阻係數變為 (A) $0.00393^\circ\text{C}^{-1}$ (B) $0.00409^\circ\text{C}^{-1}$ (C) $0.00542^\circ\text{C}^{-1}$ (D) $0.00624^\circ\text{C}^{-1}$
- ()19. 一個 20 歐姆的電阻通以 5 安培的電流，通電時間經過 3 分鐘後，電阻的發熱量為 (A)1500Cal (B)90000Cal (C)360Cal (D)21600Cal
- ()20. 如果將一銅線的長度與直徑各增加一倍，則其電阻值變為原來的 (A) $1/2$ 倍 (B)2 倍 (C)4 倍 (D) $1/4$ 倍

二、計算題

1. 有甲、乙兩條相同材質的鎳鉻線，甲的長度為乙的兩倍，乙的線徑為甲的一半，若乙的電阻為 10 歐姆，則甲的電阻為多少歐姆？
2. 銅在 20°C 的電阻溫度係數為 $0.00393^\circ\text{C}^{-1}$ ，若溫度 60°C 時，銅線電阻為 0.540 歐姆，當溫度下降 20°C 後，銅線電阻值變為若干？
3. 有一電阻為 75 歐姆的電爐，通過 2 安培的電流，使用 5 分鐘後，該電爐產生的熱量為若干？
4. 有一導線，其電阻值為 30 歐姆，若將導線均勻拉長為原來的 3 倍，則電阻值變為多少？
5. 有一電爐，其功率為 1200 瓦，若將電爐中的電熱絲減去 20%，則電功率變為多少？
6. 有一金屬導線，其直徑為 2mm、長為 1500m、電阻係數為 $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，試求此導線的電導係數及電阻各為多少？