



電阻

學習大綱

- 2-1 電阻與電導
- 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
- 2-6 本章內容摘要
- 2-7 課後習題

學習目標

1. 瞭解電阻與電導的定義
2. 認識各種電阻器
3. 瞭解電壓、電阻與電流的關係（歐姆定律）
4. 瞭解電阻溫度係數
5. 瞭解電流的熱效應（焦耳定律）

我們第一章已經介紹電子、電流、電壓、電能、電功率、電的單位，本章將導入電阻，因為電阻是直流電路最常見的負載。

2-1 電阻及電導

在力學裡，物體的移動會有摩擦力，不同的路面摩擦力也不同，在電學裡，不同的材質，也會影響電流的大小，此一影響電荷移動的阻力稱為電阻 (resistance)，符號是 R ，單位是歐姆 (Ω)。

電阻率

電阻率 (resistivity)，科學符號為 ρ ，又稱電阻係數，是描述材料導電性能的物理量。電阻率的定義是單位長度、單位截面的某種物質的電阻，數值上等於長度為一公尺、橫截面積為一平方公尺的該種物質的電阻大小。電阻率的單位是歐姆公尺 ($\Omega \cdot m$)，簡稱歐公尺。電阻率較低的物質稱為**導體**，常見導體主要為**金屬**，而自然界中導電性最佳的是**銀**。其它不易導電的物質如**玻璃**、**橡膠**等，電阻率較高，一般稱為**絕緣體**。介於導體和絕緣體之間的物質（如**矽**）則稱**半導體**。表 2-1a 是常見導體的電阻率。

► 表 2-1a 常見導體的電阻率（單位為歐姆 - 公尺，溫度是 $20^{\circ}C$ ）

物質種類	電阻率(ρ)	物質種類	電阻率(ρ)
銀	1.6×10^{-8}	鐵	10×10^{-8}
標準軟銅	1.724×10^{-8}	鉑	11×10^{-8}
硬抽銅	1.77×10^{-8}	錫	11.5×10^{-8}
金	2.44×10^{-8}	鉛	22×10^{-8}

電阻定律

對於一般物體，電阻 R 與電阻率 ρ 、長度 ℓ 與**截面積** A 之間的關係，由實驗得到數學式關係如下：

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (\text{歐姆}, \Omega)$$

(公式2-1)

電阻 R 單位為歐姆，長度 l 單位為公尺，截面面積 A 單位為平方公尺，電阻率 ρ 單位為歐姆·公尺。

範例2-1a

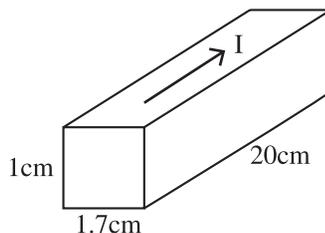
有一條材料為銀的導線，截面面積為 1.6mm^2 ，長度為 400m ，求此導線電阻值為多少歐姆？（銀的電阻率 $\rho = 1.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ）

解

截面面積的單位是 m^2 ，所以先將 mm^2 轉為 m^2 ， $1.6\text{mm}^2 = 1.6(\text{mm})^2 = 1.6 \times 10^{-6}\text{m}^2$ ，所以 $R = \rho \frac{l}{A} = 1.6 \times 10^{-8} \times \frac{400}{1.6 \times 10^{-6}} = 4\Omega$

自我練習

1. 同範例 2-1a，若截面面積為 1.6cm^2 ，長度 200km ，則此導線電阻值為多少歐姆？
2. 如右圖，長度為 20cm 銅導線的電阻值為多少歐姆？（銅的電阻率 $\rho = 1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ）



範例2-1b

A、B 兩導體以相同材料製成，B 長度為 A 長度之 3 倍，B 線徑為 A 線徑之一半，若 $R_A = 10\Omega$ ，則 R_B 為多少歐姆？

解

$$R_A = \rho \frac{l}{A} = 10\Omega$$

$$R_B = \rho \frac{3l}{\frac{1}{4}A} \quad (\text{截面面積與線直徑的平方成正比})$$

$$= 12\rho \frac{l}{A} = 120\Omega$$

自我練習

1. A、B 兩導體以相同材料製成，B 長度為 A 長度之 3 倍，B 線徑為 A 線徑之一半，若 $R_B = 12\Omega$ ，則 R_A 為多少歐姆？

範例2-1c

有一導線 10Ω ，在體積及形狀不變下，將其均勻拉長，使長度變為 4 倍時，電阻值變為多少歐姆？

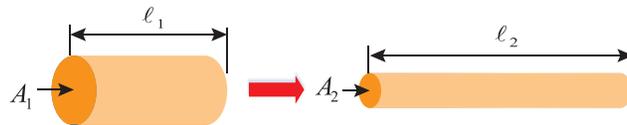


圖 (1)

解

如圖 (1)，將導線拉長 4 倍，若體積不變，則截面積變為 $\frac{1}{4}$ ，所以

$$R = \rho \frac{4\ell}{\frac{A}{4}} = 16\rho \frac{\ell}{A} = 1.6 \times 10 = 160\Omega$$

自我練習

1. 有一導線 12Ω ，在體積及形狀不變下，將其均勻拉長，使截面積為原來的 $\frac{1}{2}$ ，電阻變為多少？
2. 有一導線 10Ω ，長度取其 $\frac{2}{5}$ ，則電阻變為多少？
3. 有一額定為直流 $120V$ ， $600W$ 的電熱線，若修剪掉 $\frac{1}{3}$ 長度並將剩下的 $\frac{2}{3}$ 長度兩端接於 $48V$ 直流電壓，則剩下 $\frac{2}{3}$ 長度的電熱線消耗功率為何？

統測 111

(A) $80W$ (B) $100W$ (C) $144W$ (D) $173W$

4. 具有相同材質之 a 及 b 兩圓柱形導線，若 a 截面積為 b 的 4 倍，且 a 的長度為 b 的 2 倍，則 a 導線電阻值 R_a 與 b 導線電阻值 R_b 之比 ($R_a : R_b$) 為何？

統測 112

(A) $1 : 2$ (B) $1 : 4$ (C) $2 : 1$ (D) $4 : 1$ **電導(conductance)**

於單元 3-3 節中公式 3-7b 所列電阻並聯電路中，兩個電阻的並聯公式是：

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

為了方便以上計算，所以我們也定義電阻的倒數為電導，符號是 G ，數學式如下：

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{\rho} \times \frac{A}{l} = \sigma \frac{A}{l} \quad (\text{西門, S}) \quad (\text{公式2-2})$$

σ 稱為電導係數 (conductivity) 讀音是 sigma，為電阻率的倒數， A 是截面積，單位是 m^2 ； l 是長度，單位是 m ；電導 G 的單位西門 (S, Siemens)。(補充說明：早期電導的單位為「姆歐」(Mho，由 Ohm 即歐姆這個詞的字母順序顛倒而得，或以 Ω 來表示，現在則改用西門，符號 S)

範例2-1d

有一導線已知電阻大小分別為 25Ω ，則電導值為多少西門？

解

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{25} = 0.04\text{S}$$

自我練習

1. 有一導線電導為 5S ，在體積及形狀不變下，將其均勻拉長，使長度變為 2 倍時，電阻值變為多少歐姆？電導為多少西門？
2. 有一導線長度 50 米，電導為 0.05S ，現將其切成 5 段，綁在一起，使其長度變為 10 米，求其電導為多少？

百分率電導係數 (percentage conductivity)

標準韌銅是最常用的導電材料，我們就以其當作標準，定義一個百分率電導係數 γ 如下：

$$\gamma \% = \frac{\text{任何材料之電導係數}}{\text{標準韌銅之電導係數}} \times 100\% \quad (\text{公式2-3a})$$

$$= \frac{\text{標準韌銅之電阻係數}}{\text{任何材料之電阻係數}} \times 100\% \quad (\text{公式2-3b})$$

用來表示該導體的導電優劣，因為以銅為標準，則韌銅的百分率電導係數為 100%，表 2-1b 是常見金屬的百分率電導係數。

► 表 2-1b 常見金屬的百分率電導係數

材料名稱	$\gamma\%$	材料名稱	$\gamma\%$
銀	105%	矽鋼	45%
標準韌銅	100%	鐵	17.2%
金	71.8%	水銀	1.8%
鋁	61%	碳	0.04%

範例2-1e

標準韌銅的電阻係數是 $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，銀的電阻係數 $\rho = 1.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，求銀的百分率電導係數？

解

$$\gamma = \frac{1.7 \times 10^{-8}}{1.6 \times 10^{-8}} = 106\%$$

自我練習

- 標準韌銅的電阻係數是 $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，若鐵的電阻係數 $\rho = 10 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，求鐵百分率電導係數？
- 鐵、鋁、銅、電熱絲四種金屬的導電率大小，依序為下列何者？台水

110

- (A) 銅、鐵、鋁、電熱絲 (B) 銅、鋁、鐵、電熱絲
 (C) 電熱絲、銅、鋁、鐵 (D) 電熱絲、鐵、銅、鋁

2-2 各種電阻器

電阻器

電阻器 (resistor) 是電氣設備中最常見的元件，單位為歐姆 (Ω)，依其用途可分為可變電阻器、半可變電阻器及固定值電阻器等三種，其外觀及電路符號圖如圖 2-2a~2-2d 所示。可變電阻器，如圖 2-2a，通常放在電器的面板讓使用者調整電阻值，例如，音響設備的音量調整；半可變電阻如圖 2-2b 與 2-2c，半可變電阻通常焊在電路板，給工程師進行出廠前調整。可變與半可變電阻都有三隻腳，其 1,3 接腳兩端電阻是固定的，如電阻上的標示，分別是 2K、10K、10K(103)，調整旋鈕即可改變 (1,2) 或 (2,3) 腳之間的電阻值，因為腳位 2 的電阻位置是在腳位 1,3 之間移動，所以 (1,2) + (2,3) 的總電阻也是固定值。固定電阻如圖 2-2d。

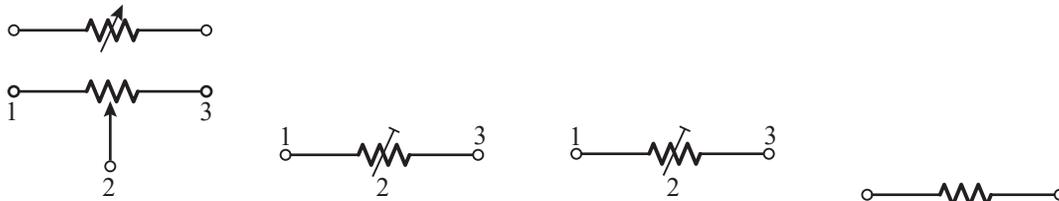


圖 2-2a 可變電阻 圖 2-2b 半可變電阻 圖 2-2c 半可變精密電阻 圖 2-2d 固定值電阻器

電阻若依材質分類，主要有碳膜電阻器、金屬膜電阻器、金屬氧化膜電阻器、繞線電阻器等，分別說明如下：

碳膜電阻器

碳膜電阻器是使用最早，最廣泛的電阻器。它是以碳沉積在瓷質基體上製成的，通過改變碳膜厚度或長度，可以得到不同的阻值。其特點是耐高溫，當環境溫度升高後，其阻值變化與其他電阻器相比很小。

☞ 金屬膜電阻器

金屬膜電阻器是在真空條件下，在瓷質基體上沉積一層合金粉製成的。通過改變金屬膜的厚度或長度可得到不同的阻值。金屬膜電阻器的特點是精度比較高，穩定性好，噪聲、溫度係數小。但由於金屬膜電阻結構不均勻，因此其脈衝負載能力差，同時造價比較高。

☞ 金屬氧化膜電阻器

金屬氧化膜電阻器是將錫金和銻的金屬鹽溶液進行高溫噴霧沉積在陶瓷骨架上製成的。與金屬膜電阻器相比，它具有抗氧化、耐酸、抗高溫等優點，不過它的阻值一般偏小，只能用來製作低阻值電阻。

☞ 繞線電阻器

繞線電阻器是用康銅絲纏繞在絕緣骨架上製成的。它有很多優點，如耐高溫、精度高、功率大。但其調頻特性差，這主要是由於其分布電感較大。常見的繞線電阻有水泥電阻，保險電阻等。

敏感電阻

電阻若依用途可分為熱敏電阻、光敏電阻、氣敏電阻、壓敏電阻、濕敏電阻、磁敏電阻、力敏電阻等，這些稱為敏感電阻。敏感電阻是對溫度、光線、指定氣體、電壓、濕度、磁場、壓力等作用敏感的電阻器，分別說明如下：

☞ 熱敏電阻

熱敏電阻的阻值隨著溫度變化而變化，可分為正溫度係數（PTC）和負溫度係數（NTC）兩種熱敏電阻；正溫度係數熱敏電阻的阻值隨溫度升高而升高，負溫度係數熱敏電阻的阻值隨溫度升高而降低。

☞ 光敏電阻

光敏電阻器是依據光電導效應製作而成的。當外界光照強度變化時，光敏電阻的阻值隨之變化，當光照強度變大，光敏電阻的阻值顯著減小，當光照強度變小時，光敏電阻的阻值顯著增大。

☞ 濕敏電阻

濕敏電阻由感濕層、電極、絕緣體組成，是利用濕敏材料吸收空氣中的水分而導致本身電阻值發生變化這一原理而製成的，常用作濕度檢測元件。

☞ 氣敏電阻

氣敏電阻是利用金屬氧化物半導體表面吸收某種氣體分子時，會發生氧化反應或還原反應而使電阻值改變的特性製成的電阻器。

☞ 壓敏電阻

壓敏電阻是利用半導體材料製成的，其電阻值可依外加電壓而變化。

☞ 磁敏電阻

磁敏電阻是利用半導體的磁阻效應製造的，電阻值可隨磁力大小而變。

☞ 力敏電阻

力敏電阻器利用壓力電阻效應製成，是一種阻值隨壓力變化而變化的電阻器。

電阻值的標示

常見的電阻值的標示有色碼標示與數字標示，分別說明如下：

☞ 色碼標示

色碼標示又分為四環標示，如圖 2-2e 與五環標示，如圖 2-2f。第一，兩者使用相同色環，如圖 2-2g，只是五環標示多一個有效值，所以其精密

度比較高。第二，不管是四環或五環，環與環的間隙，都有一個間隙比較寬，請將此間隙放在最右邊，此間隙右邊的環代表誤差值；第三，四環的前兩碼，分別代表十位數與個位數，第四，五環電阻前三碼，分別代表百位數、十位數與個位數；間隙較大左邊一環則代表 10 的乘幂（也就是後面加零的個數）。

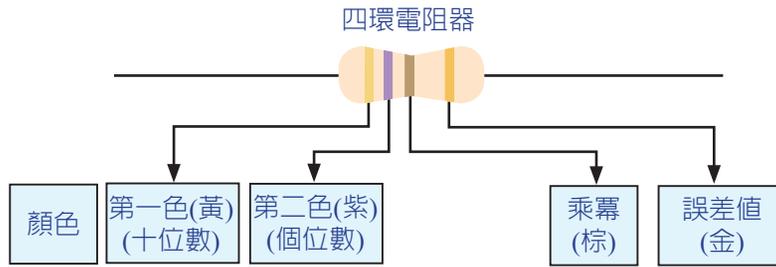


圖 2-2e 四環電阻器

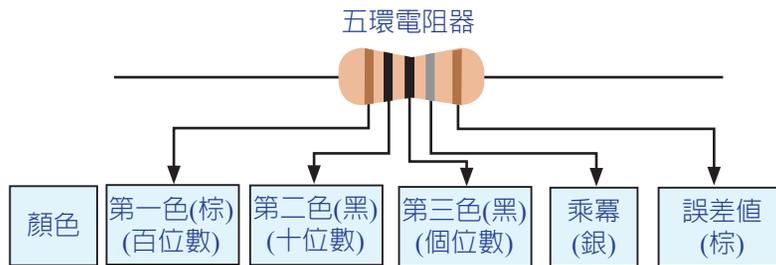


圖 2-2f 五環電阻器

黑	0	0	0	10^0	
棕	1	1	1	10^1	±1%
紅	2	2	2	10^2	±2%
橙	3	3	3	10^3	
黃	4	4	4	10^4	
綠	5	5	5	10^5	±0.5%
藍	6	6	6	10^6	±0.25%
紫	7	7	7	10^7	±0.10%
灰	8	8	8		±0.05%
白	9	9	9		
金				10^{-1}	±5%
銀				10^{-2}	±10%
無					±20%

圖 2-2g 色碼與數字對照表

範例2-2a

如圖 2-2e 所示，請寫出電阻的電阻值與可能範圍。

操作步驟

1. 將電阻橫放。
2. 此為四環電阻。
3. 將間隙較寬的放在右邊，色環顏色分別是黃、紫、棕、金。
4. 第 1 環是黃色，其值是 4；第 2 環是紫色，其值是 7；第 3 環是棕，表示 10^1 ，所以電阻值是 $47 \times 10^1 = 470\Omega$ 。
5. 第 4 環是金，表示誤差值是 $\pm 5\%$ 。所以表示此電阻值可能落在 $470 \pm (470 \times 0.05) = 470 \pm 23.5 = 446.5\Omega \sim 493.5\Omega$ 之間。

自我練習

1. 請寫出以下色碼的電阻值與誤差。

題號	色碼	電阻值	誤差
1	棕黑紅金		
2	黃紫藍銀		
3	橙白黑棕		
4	棕黑金無		

2. 請任意拿出 5 個四環電阻，寫出其顏色、電阻值、誤差百分比與電阻可能範圍。

範例2-2b

如圖 2-2f 所示，請寫出電阻的電阻值與可能範圍。

操作步驟

1. 將電阻橫放。
2. 此為五環電阻。
3. 將間隙較寬的放在右邊，色環顏色分別是棕、黑、黑、銀、棕。

- 第 1 環是棕色，其值是 1；第 2 環是黑色，其值是 0；第 3 環是黑色，其值是 0；第四環是銀色表示乘以 0.01，所以電阻值是 $100 \times 0.01 = 1\Omega$ 。
- 第 5 環是棕色，表示誤差值是 $\pm 1\%$ 。所以表示此電阻值可能落在 $1 \pm 0.01 = 0.99\Omega \sim 1.01\Omega$ 之間。

自我練習

- 請寫出以下色碼的電阻值與誤差。

題號	色碼	電阻值	誤差
1	棕黑白紅金		
2	黃紫灰藍銀		
3	橙白綠黑棕		
4	棕黑黃金金		
5	紅黑黑銀無		

- 請任意拿出 5 個五環電阻，寫出其顏色、電阻值、誤差百分比與電阻可能範圍。

數字標示

數字的標示也有兩種，分別是直接標示與數字標示，如圖 2-2a 的「2K」與圖 2-2b 的「10K」則為直接標示。圖 2-2c 則為數字標示，103 的第一個數字所代表的是電阻值的十位數，第二個數字代表電阻值的個位數，最後一個數字所代表的是十的乘冪，也就是數字後面加零的個數，所以 103 的數值代表其電阻值為 $10000\Omega = 10k\Omega$ 。

自我練習

- 某一可變電阻標示 202，請問其電阻值。
- 如圖 (1) 所示電路，五色碼電阻色環依序讀取為「棕棕黑橙綠」，安培計 (A) 的讀值約為何？ 統測 111
(A) 1A (B) 100mA
(C) 1mA (D) 0.01mA

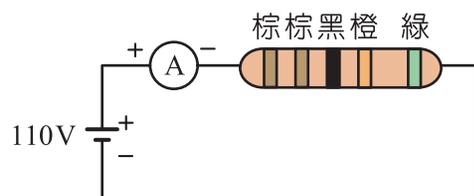


圖 (1)

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：

第 1：電阻不變時，所加電壓愈大，所產生的電流愈大，也就是 I 與 V 成正比。

第 2：外加電壓不變時，負載電阻愈大，所產生之電流愈小，也就是 I 與 R 成反比。

依照以上實驗，歸納出同一電路裡的電壓 V 、電流 I 與電阻 R 之關係如下：

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

(公式 2-4)

以上電壓 V 單位是伏特，以符號 V 表示，電阻 R 單位是歐姆，以符號 Ω 表示，電流 I 單位是安培，以符號 A 表示，此稱為歐姆定律 (Ohm's law)。

範例 2-3a

如圖 (1) 所示，若 $V=9V$ ，則 $I=?$

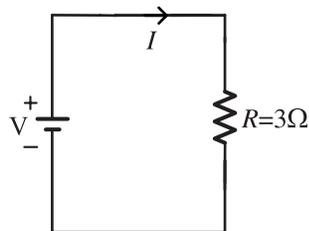


圖 (1)

解

依據歐姆定律 $I = \frac{V}{R} = \frac{9}{3} = 3A$ 。

自我練習

1. 如圖 (2) 所示，若流過電阻的電流 $I=2mA$ ，則 $V=?$

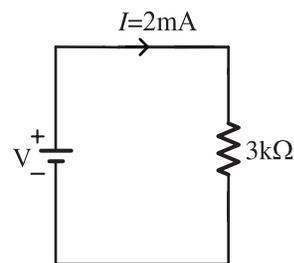


圖 (2)

2. 將一個五環色碼電阻串接直流安培計，再串接於 12.4V 之直流電壓源，安培計讀值為 20mA，此色碼電阻的色環依序（第一環至第五環）可能為何？ 統測 112
- (A) 藍紅黑棕棕 (B) 藍灰黑金棕 (C) 藍紅黑黑棕 (D) 藍紫黑銀棕

範例2-3b

電路如圖 (1) 所示，求流經電阻的電流 $I = ?$

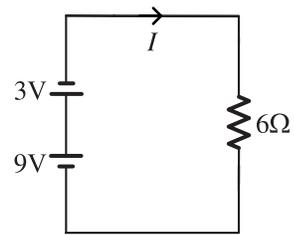


圖 (1)

解

將 9V 的負極 a 點當作接地點，如圖 (2)，則

$$V_a = 0, V_b = 9V, V_c = 6V$$

$$\text{所以 } I = \frac{V_c}{R} = \frac{6}{6} = 1A$$

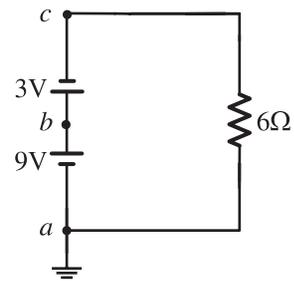


圖 (2)

自我練習

1. 如圖 (3) 求流經 4Ω 的電流？方向是順時針或逆時針？

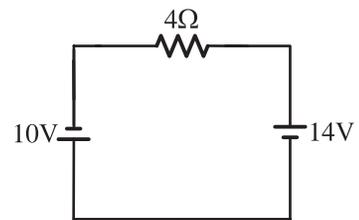


圖 (3)

範例2-3c

如圖 (1) 所示，求流經各電阻的電流與方向。

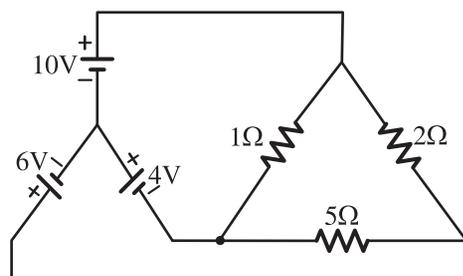


圖 (1)

解

1. 指派接地點位置，本例指派 a 點接地，如圖 (2)。
2. 標示各電阻交會點的名稱，如圖 (2)。
3. 標示各電阻的電流方向，如圖 (2)。(若求出之電流為負，代表方向與當初假設的方向相反)

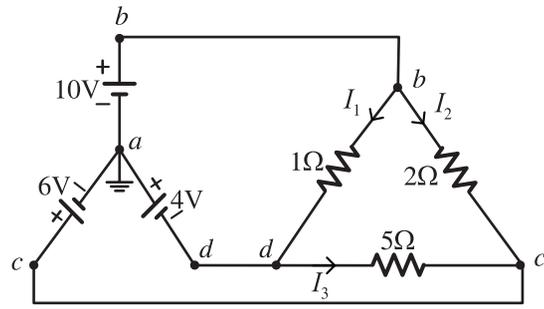


圖 (2)

4. $V_a=0$, $V_b=10$, $V_c=6V$, $V_d=-4V$
5. $V_{bd}=V_b-V_d=10-(-4)=14V$, 所以 $I_1=\frac{14}{1}=14A$ (方向向下)
6. $V_{bc}=V_b-V_c=10-6=4V$, 所以 $I_2=\frac{4}{2}=2A$ (方向向下)
7. $V_{dc}=V_d-V_c=-4-6=-10V$, 所以 $I_3=\frac{-10}{5}=-2A$ (方向向左)

自我練習

1. 電路如圖 (3)，求 I_1 、 I_2 、 I_3 的大小與方向。

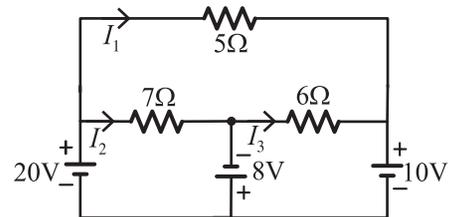


圖 (3)

功率與歐姆定律

前面在單元 1-5 節與單元 1-6 節中我們定義電能 (符號 W) 是將一電荷 (符號 Q) 於一個電位差 (符號 V) 移動所做的功：

$$W=Q \times V \text{ (焦耳, J)}$$

功率 (符號 P) 則是單位時間所做的功：

$$P=\frac{W}{t} \text{ (瓦特, W)}$$

將 W 代入，且電流 $I=Q/t$ ，所以：

$$P=Q \times V/t=IV$$

得到電路元件的功率是其端電壓與流過電流的乘積。現在歐姆定律是 $V=IR$ ，所以功率共有 3 個公式如下：

$$P = IV = I^2R = \frac{V^2}{R} \quad (\text{瓦特, W}) \quad (\text{公式2-5})$$

所以看到功率，就要很快寫出以上公式，然後再看題目提供哪些已知資料，決定使用那一個公式，請看以下範例說明。

範例2-3d

請計算標示端電壓 200V，功率 40W 的燈泡所流過的電流與內部電阻 R 。

解

1. 看到功率，就寫出功率的 3 個計算公式如下：

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

2. 題目給功率與端電壓，所以 $P=IV \Rightarrow 40=I \cdot 200 \Rightarrow I=0.2\text{A}$ 。
3. 再由歐姆定律 $V=IR \Rightarrow 200=0.2 \cdot R \Rightarrow R=1000\Omega=1\text{k}\Omega$ 。

自我練習

1. 同範例 2-3d，若將此燈泡接上 100V 的電流，請問流過的電流是多少？功率是多少？

範例2-3e

有一電熱絲的電阻是 50Ω ，請問插入 100V 的電源，其功率是多少？電流是多少？

解

1. 看到功率，就寫出功率的 3 個公式如下：

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

2. 現在已知 R 與 V ，所以 $P = \frac{V^2}{R} \Rightarrow P = \frac{100^2}{50} = 200\text{W}$ 。
3. 再由歐姆定律 $I = \frac{V}{R} = \frac{100}{50} = 2\text{A}$ 。

自我練習

1. 同範例 2-3e，若將此電熱絲剪掉 $1/5$ ，且改插入 40V 的電源。請問其功率與電流是多少？
2. 間接加熱型煮飯用電鍋，其單相電源電壓有效值為 110V ，煮飯用電熱線的功率為 800W ，保溫用電熱線的功率為 40W ，下列敘述何者正確？

統測 111

- (A) 煮飯用電熱線的電阻值大於保溫用電熱線的電阻值
- (B) 煮飯用電熱線的電阻值等於保溫用電熱線的電阻值
- (C) 煮飯時量測電源電流有效值約為 3.6 A
- (D) 保溫時量測電源電流有效值約為 0.36 A

2-4 電阻溫度係數

於前面 2-3 節，我們已經談到有電壓就有電流，這節我們要探討，有電流通過，導體溫度就會改變，溫度的改變，也會影響電流的流動，所以電阻值也改變了。本節希望建立一個模式，探討溫度的變化對電阻值的影響。若溫度上升，電阻值隨之增加，稱此物質具有正溫度係數 (positive temperature coefficient, PTC)，一般為金屬材料，如圖 2-4a。若溫度上升，電阻值隨之減少，稱此物質具有負溫度係數 (negative temperature coefficient, NTC)，一般為半導體或絕緣體，如圖 2-4a。

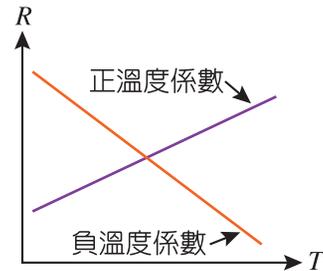


圖 2-4a 電阻值隨溫度變化曲線圖

以金屬導體為例，溫度下降時，電阻也隨之下降，溫度在中間，其電阻變化是接近線性（直線）的，而該範圍之外則非線性，如圖 2-4b，因為中間溫度是接近線性的，我們就利用相似三角形等比的觀念，建立一個模型，可以推測所有溫度的電阻值。

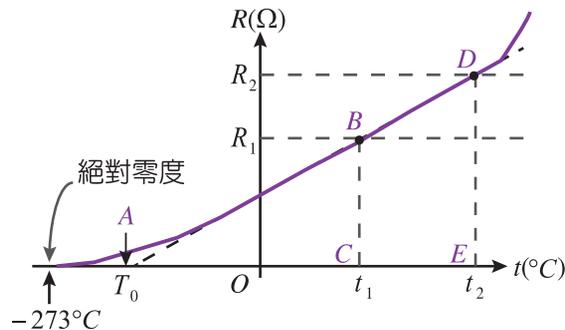


圖 2-4b 正溫度係數的 R-t 關係曲線

於圖 2-4b，若溫度一直下降，於絕對溫度 -273°C 時，所有導體的電阻將會為零，此溫度稱為絕對溫度 (absolute temperature)。為了方便我們概略計算每種導體溫度變化時電阻值的變化，我們就假設其為直線，當此直線與零電阻交會的溫度，我們稱此溫度為推論絕對溫度 T_0 (inferred absolute temperature)。每一導體的推論絕對溫度都不同，如表 2-4a，以銅為論，其值是 -234.5°C ，這樣我們就可以使用相似三角形概估任意溫度的電阻。例

如，於圖 2-4b，溫度 t_2 (E 點) 時電阻 R_2 (D 點)，溫度 t_1 (C 點) 時，電阻 R_1 (B 點)，以 DB 兩點畫直線，將會交 x 軸於 A 點，此點即為 T_0 ，此時 $\triangle ABC$ 與 $\triangle ADE$ 相似，相似三角形邊長成正比，所以

$$\frac{\overline{BC}}{\overline{DE}} = \frac{\overline{AC}}{\overline{AE}}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{|T_0| + t_1}{|T_0| + t_2}$$

(公式2-6)

利用以上公式，只要我們知道 t_1 溫度是 R_1 ，就可以推測任何溫度 t_2 的電阻值 R_2 ，請看以下範例說明。

► 表 2-4a 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

範例2-4a

銅的推論絕對溫度是 -234.5°C ，溫度 15.5°C 的銅線圈馬達電阻是 30Ω ，運轉後溫度是 65.5°C ，請問其電阻值是多少。

解

1. 銅是正溫度係數，溫度越高，電阻愈大，且其推論絕對溫度是 -234.5°C ，所以以溫度 t 為 x 軸，電阻 R 為 y 軸，繪出 R - t 圖，如圖 (1)，依據相似三角形定理，其對應邊長成正比。
2. 因為 $\triangle ABC \sim \triangle ADE$ ，所以：

$$\frac{\overline{BC}}{\overline{AC}} = \frac{\overline{DE}}{\overline{AE}} \Rightarrow \frac{30}{234.5 + 15.5} = \frac{R}{234.5 + 65.5}$$

化簡得到 $R = 36\Omega$

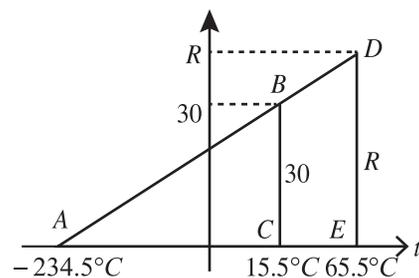


圖 (1)

自我練習

1. 銀的推論絕對溫度是 -243°C ，某一銀於溫度 57°C 時 12Ω ，求當溫度是 -43°C 時的電阻。

電阻溫度係數(temperature coefficient of resistance)

前面使用推論絕對溫度計算未知溫度的電阻，每次還要畫相似三角形，這樣有點費時。爲了方便工程師計算任意溫度的電阻，所以定義電阻溫度係數，電阻溫度係數的定義如下：該物質「溫度每升高 1 度所增加的電阻值」與「該溫度電阻值」的比值，符號是 α ，單位是「 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 」。例如，銅 15.5°C 時電阻是 10Ω ， 65.5°C 時是 70Ω ，則其 15.5°C 的電阻溫度係數是

$$\alpha_{15.5} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} = \frac{70 - 10}{10} = \frac{60}{10} = 0.12^{\circ}\text{C}^{-1} \quad \text{(公式2-7)}$$

工程師通常把常溫（本例爲 t_1 ）的電阻溫度係數先計算好，當機器運轉後的每個溫度 t_2 就可以代入以下公式，預知電阻 R_2 的變化。

$$\alpha_{t_1} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \Rightarrow \frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1} = \alpha_{t_1} \cdot R_1 \Rightarrow R_2 = R_1[1 + \alpha_{t_1}(t_2 - t_1)] \quad \text{(公式2-8)}$$

範例2-4b

若銀 20°C 時的電阻是 30Ω ， 60°C 時的電阻是 31Ω ，求銀 20°C 的電阻溫度係數。

解

依照電阻溫度係數的定義寫出公式。

$$\alpha_{20} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} = \frac{31 - 30}{30} = \frac{1}{30} \doteq 0.00083^{\circ}\text{C}^{-1}$$

自我練習

1. 同範例 2-4b，試求銀 60°C 的電阻溫度係數是多少？

2. 有一電阻器在 30°C 時其電阻值為 3Ω ，在 150°C 時其電阻值為 6Ω ，則此電阻器在 30°C 時之溫度係數為何？ 統測 110
 (A) $(1/120)^{\circ}\text{C}^{-1}$ (B) $(1/90)^{\circ}\text{C}^{-1}$ (C) $(1/60)^{\circ}\text{C}^{-1}$ (D) $(1/30)^{\circ}\text{C}^{-1}$
3. 用於室內配線之銅導線，在室溫 $t_1^{\circ}\text{C}$ 下，長為 l 米、直徑為 D 毫米、電阻係數為 $\rho\Omega\cdot\text{m}$ 、推論絕對溫度為 -234.5°C ，下列敘述何者正確？ 統測 109

(A) 其等效電阻值為 $\frac{4\rho l}{\pi D^2}\Omega$

(B) 若導線被剪掉四分之一長度，則其等效電阻值變為 $\frac{\rho l}{\pi D^2}\text{k}\Omega$

(C) 若導線被均勻拉長為原來的 N 倍（體積不變）則其等效電阻值變為 $\frac{N^3\rho l}{\pi D^2}\text{k}\Omega$

(D) 若室溫 上升為 $t_2^{\circ}\text{C}$ 則其等效電阻值變為

$$\frac{4\rho l(1+\frac{t_2}{234.5})}{\pi D^2(1+\frac{t_1}{234.5})}\text{M}\Omega$$

範例 2-4c

若銅 20°C 時的電阻溫度係數是 $0.004^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，電阻是 10Ω 。
 求銅 60°C 時的電阻？

解

1. 依照電阻溫度係數的定義，寫出公式如下：

$$\alpha_{20} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} = 0.004 \Rightarrow \frac{R_2 - 10}{10} = 0.004 \Rightarrow R_2 = 11.6\Omega$$

2. 也可以依照公式 $R_2 = R_1[1 + \alpha_{t_1}(t_2 - t_1)] = 10[1 + 0.004(60 - 20)] = 11.6\Omega$ 。

自我練習

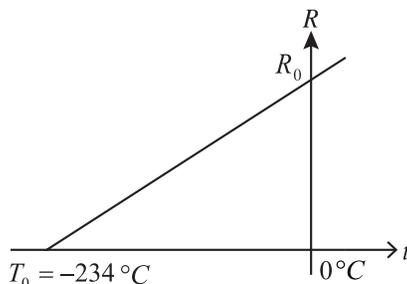
1. 同範例 2-4c，求銅 -10°C 時的電阻？

範例2-4d

銅的推論絕對溫度 T_0 是 -234°C ，試求其 0°C 時的電阻溫度係數 $\alpha_0 = ?$

解

求 0°C 的電阻溫度係數， t_1 取 0°C ， 0°C 的電阻 R_0 ， t_2 則取 T_0 ， T_0 的電阻為 0，所以



$$\alpha_0 = \frac{R_2 - R_0}{t_2 - t_1} = \frac{0 - R_0}{T_0 - 0} = \frac{-1}{T_0} = \frac{1}{|T_0|} = \frac{1}{234} \doteq 0.0043^\circ\text{C}^{-1}$$

(公式2-9)

(請留意 T_0 是負值)

補充說明

由本範例可知，只要有該材料推論絕對溫度，就可以得到電阻溫度係數。

自我練習

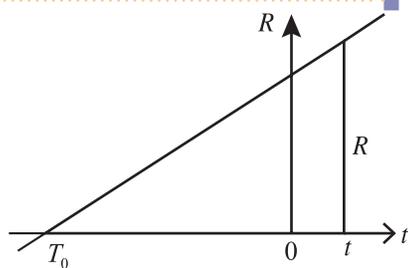
1. 若銀的推論絕對溫度是 -243°C ，求銀 0°C 的電阻溫度係數 $\alpha_0 = ?$

範例2-4e

續範例 2-4d，若銅 0°C 的電阻溫度係數為 α_0 ，求任意溫度 t 的電阻溫度係數 α_t 與 α_0 的關係？

解

1. 本例求 $t^\circ\text{C}$ 的電阻溫度係數， t_1 取 $t^\circ\text{C}$ ， $t^\circ\text{C}$ 時的電阻 R ； t_2 則取 T_0 ， T_0 的電阻為 0。



$$\alpha_t = \frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1} = \frac{0 - R}{T_0 - t} = \frac{-1}{T_0 - t} = \frac{1}{|T_0| + t}$$

(公式2-10)

(請留意 T_0 是負值)

2. 由範例 2-4d，求得 $|T_0| = \frac{1}{\alpha_0}$ 代入，

$$\text{得到 } \alpha_t = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + t}$$

(公式2-11)

補充說明

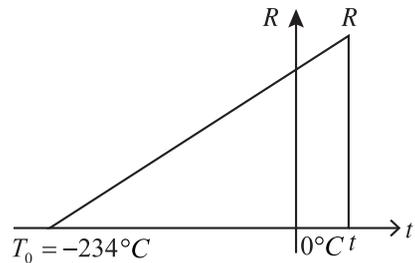
由本範例可知，只要有零度電阻溫度係數，就可計算任何溫度的電阻溫度係數。

範例2-4f

續範例 2-4e，若銅的 0°C 電阻溫度係數 $\alpha_0 = 0.004^\circ\text{C}^{-1}$ ，求銅 20°C 的電阻溫度係數？

解

$$\text{由 } \alpha_t = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + t} \text{ 得到 } \alpha_{20} = \frac{1}{\frac{1}{0.004} + 20} \doteq 0.0037^\circ\text{C}^{-1}$$

**自我練習**

- 同範例 2-4f，求銅 -30°C 的電阻溫度係數？
- 若銀的 $T_0 = -243^\circ\text{C}$ ：
 - 求銀 0°C 的電阻溫度係數？
 - 求銀 40°C 的電阻溫度係數？
 - 求銀 -20°C 的電阻溫度係數？
- 若銀的 $T_0 = -243^\circ\text{C}$ ，有一銀製線圈，於機器還沒運轉的溫度 10 度時，電阻是 20 歐姆，請建立一個公式，可以得到任意溫度的電阻值。

2-5 焦耳定理

電流通過電阻時，電子在移動時會受到電阻阻力，會將部分電能轉換為熱能，這種現象稱為電流的熱效應。英國物理學家焦耳 (James Prescott Joule) 對電流的熱效應做了兩項實驗：

實驗一：將相同的電流，通過不同材質的導體，發現電阻較大的導體會產生較高的熱量，且通過電流的時間愈長會產生較高的熱量，即熱量與電阻及時間成正比。

實驗二：將相同的導體，通過不同的電流，發現通過的電流愈大，產生的熱量愈高，即熱量與電流的平方成正比。

綜合上述兩項實驗，得到焦耳定律 (Joule's law) 如下：電流通過導體產生的熱量 (H) 與電流的平方 (I^2)、導體的電阻 (R) 及通過的時間 (t) 成正比，以上實驗得到數學式為：

$$H = KI^2Rt \quad (\text{J})$$

(公式2-12)

以上 I 的單位符號是 A， R 的單位符號是 Ω ， t 的單位是 s， K 為比例常數， $K = 1$ 時，熱量單位為焦耳 (J)。焦耳為能量的單位，而熱量的單位為卡 (cal)， $1\text{J} = 0.24 \text{ cal}$ ，所以以上公式也可以寫成：

$$H = 0.24I^2Rt \quad (\text{卡, cal})$$

(公式2-13)

我們在國中已經學過，欲使質量為 m 的物質， s 為該物質比熱，上升 T 度所需熱量是

$$H = msT \quad (\text{卡, cal})$$

(公式2-14)

以上 m 的單位是 g， s 為比熱，水的比熱是 1， T 的單位是 $^{\circ}\text{C}$ ， H 的單位是 cal。透過以上公式，就可以計算電能與熱能的轉換，請看以下範例說明。

範例2-5a

一電阻 10Ω ，通過 2 安培電流，經過 20 秒時產生的熱量約為多少焦耳？多少卡？

解

1. 依照焦耳定律 $H = I^2 R t = 2^2 \times 10 \times 20 = 800\text{J}$ （焦耳）。
2. 1 焦耳 = 0.24 卡，所以 $800\text{J} = 0.24 \cdot 800 \text{ 卡} = 192 \text{ 卡}$ 。

自我練習

1. 有一電熱器，插入 110V 的電源，其電流是 1A，經過 10 秒後，共產生多少焦耳？多少卡？的熱量。

範例2-5b

有一電熱絲 100Ω ，通過 2 安培的電流，欲使 100 克的水上升 30°C ，需多少時間？

解

1. 依據焦耳定律 $H = 0.24 I^2 R t = 0.24 \times 2^2 \times 100 \times t = 96t(\text{cal})$ 。
2. 依據比熱定義，所需熱量 $H = msT = 100 \times 1 \times 30 = 3000(\text{cal})$ 。
3. 以上熱量由電熱絲電能提供，所以 $96t = 3000$ ， $t = 31.2$ 秒。

自我練習

1. 有一電熱絲 200Ω ，通過 2 安培的電流，對 20°C ，2000 克的水加熱 10 分鐘，則水溫上升到多少度？
2. 有一內裝 10 公升水之電熱水器，額定規格為 100V/10A，水溫為 10°C ，若以額定送電加熱 60 分鐘後，則水溫變為幾 $^\circ\text{C}$ 和消耗多少度電？

統測 108

- (A) 96.4°C ，1 度電 (B) 96.4°C ，5 度電
(C) 86.4°C ，5 度電 (D) 86.4°C ，1 度電

§2-6 本章內容摘要

1. 電阻定律：

$R = \rho \frac{\ell}{A}$ 電阻 R 單位是 Ω (歐姆, Ω ; 長度 ℓ 單位是公尺, 截面積 A 單位是平方公尺; 電阻率 ρ 單位為歐姆·公尺)。

2. 歐姆定律：

$I = \frac{V}{R}$ (安培, A; 電壓 V 單位符號是 V; 電阻 R 單位符號是 Ω)。

3. 功率與歐姆定律

$P = IV = I^2R = \frac{V^2}{R}$ (瓦特, W)

4. 電阻溫度係數的定義如下：該物質「溫度每升高 1 度所增加的電阻值」與「該溫度電阻值」的比值，符號是 α ，單位是「 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 」

$$\alpha_{t_1} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \Rightarrow R_2 = R_1[1 + \alpha_{t_1}(t_2 - t_1)]$$

5. 焦耳定律 (Joule's law) 如下：

$H = KI^2Rt$ (I 的單位符號是 A, R 的單位符號是 Ω , t 的單位符號是 s, $K=1$ 時, 熱量單位符號為 J, $K=0.24$ 時, 熱量單位符號是 cal)

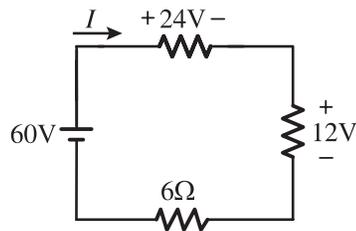
6. 電能轉熱能公式

$H = msT$ (m 的單位符號是 g, s 為比熱, 水的比熱是 1, T 的單位符號是 $^{\circ}\text{C}$, H 的單位符號是 cal)

2-7 課後習題

選擇題

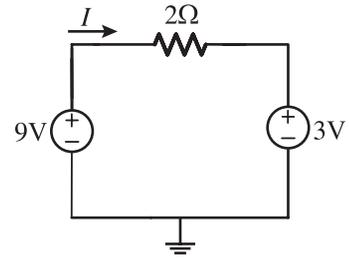
- 某加熱棒電阻為 10Ω ，接於 AC110V 電源，若要使 1210 公克 26°C 的水加熱到 50°C ，在不考慮任何損失的情況之下，需要加熱多少時間？ 台水 108
(A) 100 秒 (B) 120 秒 (C) 150 秒 (D) 200 秒
- 小明家裡有一部效率為 90%，900W 之抽水馬達，每天平均運轉 5 小時，一個月平均運轉 20 個工作天，若每度電費為 2 元，則每個月馬達損失功率浪費電費為多少元？ 台水 108
(A) 10 元 (B) 20 元 (C) 30 元 (D) 40 元
- 有甲、乙兩導體以相同材料製成，導體甲的長度為乙的 2 倍，導體甲的截面積為乙的 3 倍，若導體甲的電阻為 60Ω ，則導體乙的電阻為何？ 台水 108
(A) 10Ω (B) 40Ω (C) 90Ω (D) 360Ω
- 某一個電阻流過電流為 500 毫安培時，電阻上之電壓為 20 伏特，當電阻流過電流為 5 安培時，電阻上之電壓為何？ 台水 108
(A) 20V (B) 100V (C) 120V (D) 200V
- 一色碼電阻，若此電阻器色碼依序為綠、橙、紅、銀，則該電阻器之電阻值大小為何？ 台水 108
(A) $630\Omega \pm 5\%$ (B) $630\Omega \pm 10\%$ (C) $530\Omega \pm 5\%$ (D) $5300\Omega \pm 10\%$
- 今有兩條材料完全相同的導線，若 A 導線長度與線徑皆為 B 導線的一半，則 A 導線電阻應為 B 導線電阻之幾倍？ 台水 110
(A) 0.5 (B) 1 (C) 2 (D) 4
- 有關導線的電阻值特性，下列敘述何者正確？（複選題） 台水 110
(A) 導線的電阻與電阻係數成正比 (B) 導線的電阻隨溫度增加而減少
(C) 導線的電阻與長度成正比 (D) 導線的電阻與截面積成反比
- 如右圖所示電路， $I = ?$ 台水 106
(A) 4A (B) 3A (C) 2A (D) 1A



9. 某色碼電阻由左至右依序為紅紅紅金，請問下列選項中何者為可能之電阻值？ 台水 106
 (A) 2380 Ω (B) 2125 Ω (C) 1990 Ω (D) 1825 Ω
10. 一四環式色碼電阻顏色依序為棕黑紅銀，另一電阻顏色依序為紅黑紅銀，若將此兩電阻串聯後，則其等效電阻可能為下列何者？ 鐵路 112
 (A) 2.0M Ω (B) 3.0M Ω (C) 2.0k Ω (D) 3.0k Ω
11. 在室溫下，下列那一個材料的電阻溫度係數是負值？ 鐵路 112
 (A) 銀 (B) 鎢 (C) 鋁 (D) 矽
12. 假設銅線之電阻係數為 1.8×10^{-8} 歐姆·公尺 ($\Omega \cdot m$)，長為 100 公分，截面積為 9 平方毫米，則此銅線電阻為何？ 鐵路 112
 (A) 0.001 Ω (B) 0.002 Ω (C) 0.01 Ω (D) 0.02 Ω
13. 電阻值為 $3.6 M\Omega \pm 5\%$ 的電阻器，其四環色碼如何表示？ 112 初等考
 (A) 紅紫綠金 (B) 橙藍綠金 (C) 紅藍綠金 (D) 橙紫綠銀
14. 使 10 公克水的溫度升高 $1^\circ C$ ，其所需的電能為多少焦耳？ 112 初等考
 (A) 42 (B) 4.2 (C) 2.4 (D) 0.24
15. 有一電阻流過 2 安培電流，經過 30 秒總共消耗 7200 焦耳，此電阻所跨電壓為多少伏特？ 112 初等考
 (A) 100 (B) 120 (C) 240 (D) 3600
16. 電阻的電導為 0.2 姆歐，當該電阻兩端的電壓為 30 伏特時，流過此電阻的電流為何？ 112 特考
 (A) 2 安培 (B) 4 安培 (C) 6 安培 (D) 8 安培
17. 某材料在 $0^\circ C$ 時之電阻溫度係數為 $0.005^\circ C^{-1}$ ，則該材料的推論絕對溫度 (inferred absolute temperature) 為何？ 112 特等考
 (A) $-100^\circ C$ (B) $-150^\circ C$ (C) $-200^\circ C$ (D) $-250^\circ C$
18. 在室溫的範圍下，當溫度升高，下列何種材料的電阻值會下降？ 112 特等考
 (A) 金 (B) 銅 (C) 銅鎳合金 (D) 矽鍺半導體
19. 0.1mA 的電流流經色碼為棕、紅、黃的電阻，則電阻所受到的電壓為何？
 (A) 9V (B) 10V (C) 11V (D) 12V

20. 如右圖所示，求電流 I 為何？ 111 鐵路

- (A) 3 安培
- (B) -3 安培
- (C) 6 安培
- (D) -6 安培



素養觀念題

- 請比較猴子兩腳同時走在 110V 的火線與一隻腳踩火線，另一隻腳踩中性線的差別？
- 請問水電工修理線路時，穿絕緣鞋與赤腳的差別在哪裡？
- 目前新型冰箱、洗衣機都是使用三線式電源插頭，請問與傳統兩線式插頭的差別？
- 請問洗衣機的電源線的火線若被老鼠咬破，導致裸落的火線碰觸洗衣機外殼，請比較洗衣機外殼是否接地的差別。
- 拔插頭時，請問手要按住插頭，還是按住插頭後面的電線，其差別在哪裡？
- 小明在家想實驗歐姆定律，就拿 9V 電池接 10Ω 電阻，請問是否能驗證歐姆定律？
- 電路如圖 (1)，要驗證歐姆定律，老師建議電路焊接如圖 (2) (圖中黑線代表電路板下面有銅線連接)，請問電源該如何輸入，電流該如何測量？

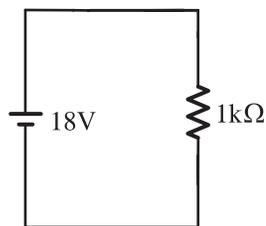


圖 (1)



圖 (2)

MEMO