

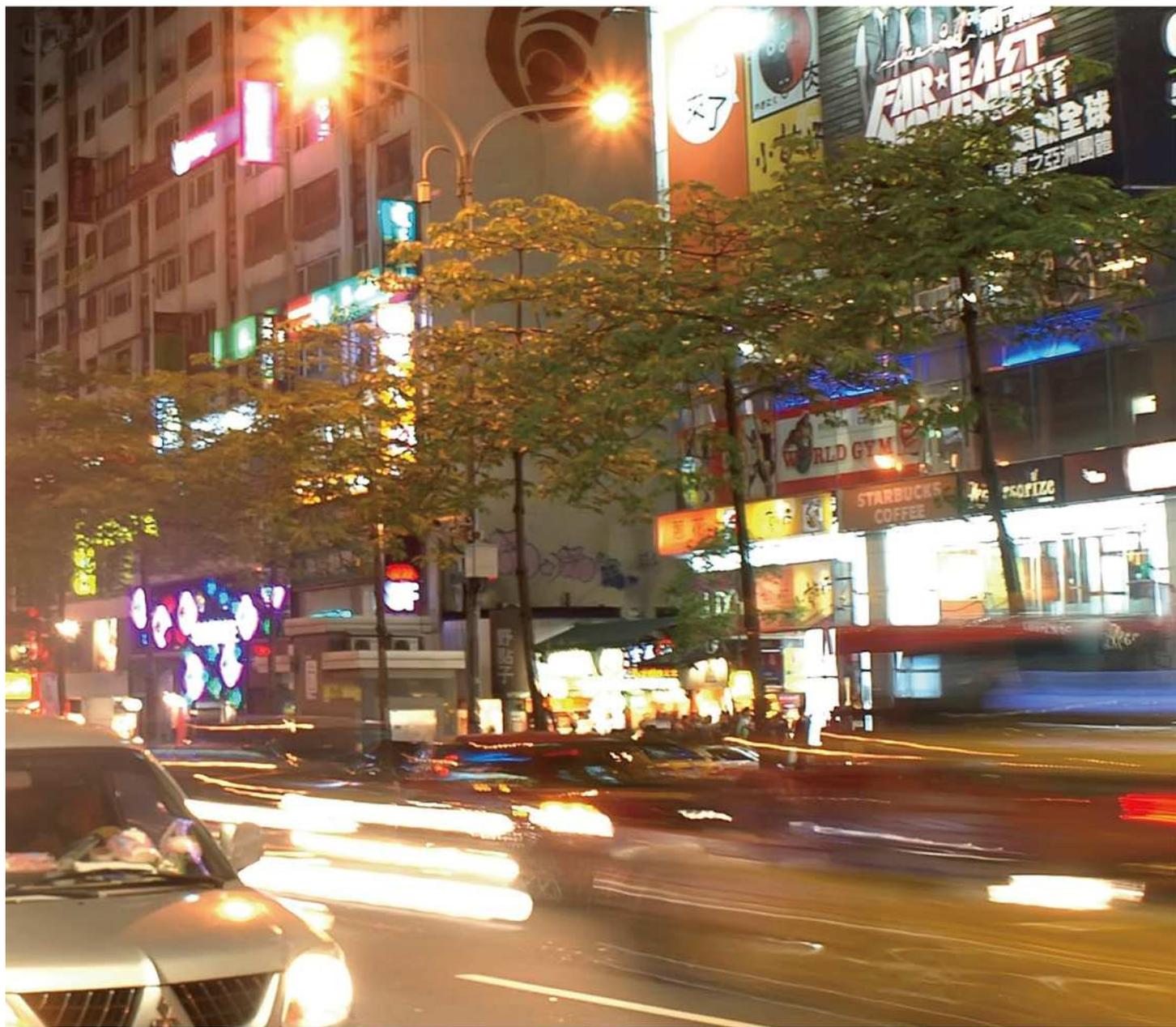
7-1 電動勢與電流

7-2 電阻與歐姆定律

7-3 電流的熱效應與電功率



電流通過各式燈具，不僅將電能轉換成光能，更像仙女棒般將所到之處妝點成魔幻般的不夜城。



名人語錄

I never perfected an invention that I did not think about in terms of the service it might give others... I find out what the world needs, then I proceed to invent...

在我還沒有想到它可能為大眾帶來什麼好處前，我從不會去完成一項發明，……我會去發掘這世界需要什麼，然後就著手發明…

— 愛迪生 (Thomas Alva Edison, 1847 -1931)

當電荷在導體中運動時，就產生了電流。1799年義大利科學家伏打（Count Alessandro Volta, 1745 - 1827）發明了電池以及稱為伏打堆的串聯電池（圖 7-1），能產生連續而穩定的電流，使得電磁學的研究得到了迅速的發展。

電流是我們日常生活中許多用品的驅動來源。舉例來說，當手電筒的開關打開時，手電筒的電池會驅動電流，使燈泡獲得電能而發光。在大自然中也不乏電流的現象，例如夏日午後常見的閃電，顯示了空中大量電荷流動的軌跡。甚至在生物體內的神經信號傳遞時，也產生有微小的電流。

在本章中我們將探討如何使電荷流動？電流流經導體時，會產生哪些效應？能量的形式如何轉換？在一封閉的迴路中如何分析電路？



▲圖 7-1 將含食鹽水的溼布夾在銀和鋅的圓板中間，按銀、布、鋅、銀、布、鋅……的次序堆疊，用導線連接最頂端的銀板和最底層的鋅板，如此便可製造稱為伏打堆的電池。

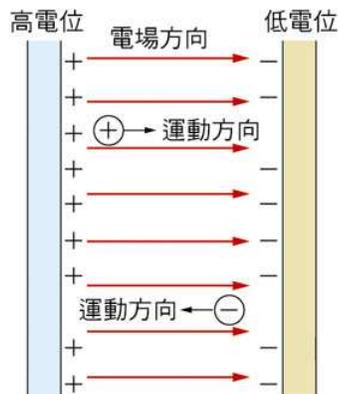
## 7-1 電動勢與電流

在靜電學中，若兩平行金屬板帶等量異性電，正電板與負電板間有電位差，則電板層間將產生均勻電場，電場方向由正電板（高電位）指向負電板（低電位）。靜止的電荷在電板層間將受到靜電力而作加速運動，如圖 7-2 所示，若為正電荷，則由高電位處運動至低電位處，即運動方向與電場方向相同；若為負電荷，則由低電位處運動至高電位處，即運動方向與電場方向相反。

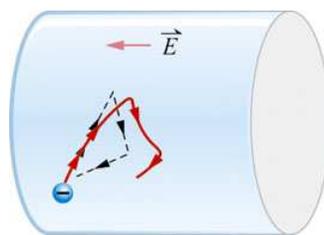
### 1. 電流

在靜電平衡的金屬導線中，導線內的自由電子會像氣體分子一樣，持續在各個方向上作無規運動，且不停地與固定的原子發生碰撞，故所有自由電子的平均速度為零。若在導線兩端施加固定的電位差，則導線內將產生一沿著導線方向從高電位指向低電位的電場。在電場驅使下，帶負電的自由電子有逆著電場方向的平均速度，如圖 7-3 所示。以上現象若從巨觀來看，自由電子便集體從低電位移向高電位，因而形成**電流**（electric current 或 current）。

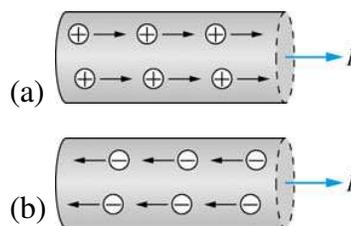
傳統上規定正電荷流動的方向為電流的方向（圖 7-4(a)），但是在金屬導線中，其電流  $I$  實際上來自於帶負電荷的自由電子之流動，所以導線中所形成電流的方向和自由電子流動的方向相反（圖 7-4(b)）。



▲圖 7-2 均勻電場內正電荷的運動方向與電場相同，負電荷的運動方向與電場相反。



▲圖 7-3 金屬內某一自由電子在一小段時間內的運動示意圖：紅色實線是有朝左的電場時之運動軌跡，黑色虛線是電場為零的運動軌跡。



▲圖 7-4 等電量的(a)正電荷或(b)負電荷若在相同時間間隔內以相反方向分別穿過相同的截面時，兩者所形成電流  $I$  的大小與方向相同。

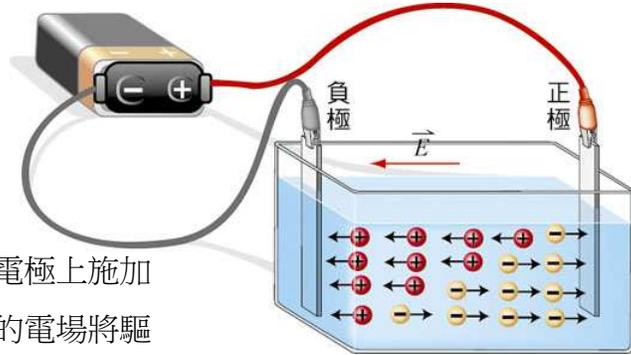
在  $\Delta t$  的時間間隔內，通過導體內某一截面的總電量為  $\Delta Q$ ，則在此段時間內通過此截面的平均電流  $I_{av}$  定義為

$$I_{av} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \text{7-1 式}$$

若所取的時間間隔極短，則在某時刻的瞬時電流  $I$  定義為

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \text{7-2 式}$$

電流的 SI 單位為庫侖/秒（即 C/s），稱為**安培**（ampere，以 A 表示）。由上式可知 1 安培電流是指在導體的某一截面上，每 1 秒內有 1 庫侖的電量流過。



▲圖 7-5 電解池示意圖。池內正離子運動方向與電場方向相同，而負離子則相反，但是兩者所形成之電流方向皆由正極至負極。

如果在電解池的兩個電極上施加電位差，則電解池內生成的電場將驅使正離子與負離子運動形成電流。如圖 7-5 所示，在電場作用下，電解池中的正離子，從高電位流向低電位，即其正離子所形成之電流方向向左；而負離子則從低電位流向高電位，負離子所形成之電流方向亦向左，所以在計算電解池內某一截面的總電流時應合併計算正離子和負離子所形成之電流。



### 做一做

找出家裡的配電箱（通常在客廳牆壁），並打開箱蓋，會發現每個開關都標示一電流值。請和班上同學討論該電流值所代表的意義。



### 在導線中建立電場的速率

我們一開燈，電燈立刻就亮了，並不是自由電子在導線內的運動速率非常快，而是接通電源的導線兩端因為有電位差，便以極快的速率（接近真空中的光速）在導體上各處建立電場。導線上的電場驅動導線上各處的自由電子運動，其中最靠近電燈處的自由電子便流經電燈使其發亮。

### 範例 7-1

如圖 7-5 在電解池中的某截面，20 秒內有  $1.0 \times 10^{19}$  個負離子向右穿過該截面，同時有  $2.5 \times 10^{19}$  個正離子向左穿過該截面，若每個負離子的電量等於電子電量，且每個正離子的電量為負離子兩倍，則連接電解池導線內的電流為何？

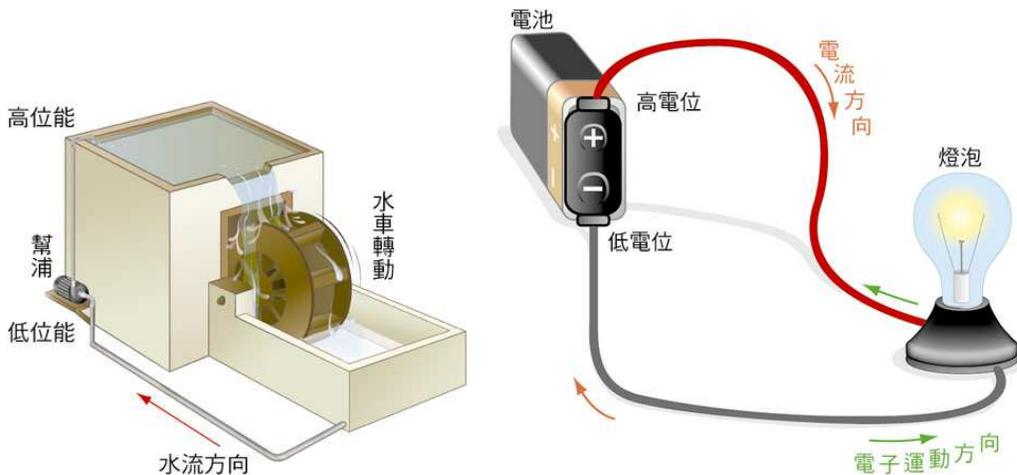
[解答] 20 秒內流經該截面的總電量  $\Delta Q$

$$\Delta Q = (1.0 \times 10^{19} + 2 \times 2.5 \times 10^{19})(1.6 \times 10^{-19}) = 9.6 \text{ C}$$

由 (7-1) 式得流經電池的平均電流為  $I = \frac{9.6 \text{ C}}{20 \text{ s}} = 0.48 \text{ A}$ 。

## 2. 電動勢

若導線兩端的電位有高低的差異，可使電荷流動形成電流，就好像水管兩端有高低的差異，可推動水流動一般。如圖 7-6(a) 所示，如果想讓有限的水持續流動，則需利用幫浦將流至低處的水移至高處，水管內才能持續有水流。同樣地，如果要讓導線內有限的自由電子持續流動，那麼導線兩端就要接上可以將流至低電位能處的自由電子移至高電位能處的裝置，此裝置稱為電源（圖 7-6(b)）。



▲圖 7-6 (a)幫浦將水從低處移至高處；(b)電池將正電荷從低電位處移至高電位處或將電子從高電位處移至低電位處。

因為在導線內之電流方向是由高電位移向低電位，所以電源內部具有持續使電流由低電位移動至高電位的能力，稱為電源的**電動勢**（electromotive force，簡稱 emf，記為  $\mathcal{E}$ ）。電池便是一種利用化學反應產生固定電動勢的直流電源。

電流由電池的負極移至正極時，電池提供能量  $W$  給電量  $q$  的電荷，則電池的電動勢  $E$  定義為

$$\mathcal{E} = \frac{W}{q} \quad \text{7-3 式}$$

電動勢的 SI 單位為焦耳/庫侖（即 J/C），也就是伏特（V），和電位與電位差的單位相同。由（7-3）式可知，1 庫侖的正電荷從電池的負極移至正極，若電池因為化學反應而提供 3 焦耳的能量，則電動勢為 3 伏特。

電路上 a、b 任意兩點的電位差  $V_{ab}$ ，也稱為電壓，而電池正極、負極的電位差則稱為端電壓，通常以  $V$  表示。端電壓  $V$  是電池供電時，對外接線路所能提供的電壓。當電動勢為  $E$  的電池對外接線路供電，若電池提供電量  $q$  之電荷的能量  $q\mathcal{E}$  全部轉換成外接線路可用的電能  $qV$ ，則電池的電動勢  $\mathcal{E}$  等於端電壓  $V$ ，稱為理想電池。然而一般的電池，電荷在其內部流動時，因為電池提供的能量  $q\mathcal{E}$  有一部分會被電池內部損耗成熱，所以外接線路可用的電能  $qV$  小於  $q\mathcal{E}$ ，故電池的端電壓  $V$  小於電動勢  $E$ 。

### 範例 7-2

一電池連接一燈泡，流經電池的電流為 0.050 A，若電池的電動勢為 1.5 V，則在 10 分鐘內，電池消耗多少化學能？

[解答] 由（7-1）式可知 10 分鐘內流經電池的總電量

$$\Delta Q = (0.050 \text{ C/s}) \times (10 \times 60 \text{ s}) = 30 \text{ C}$$

故由（7-3）式可得電池所消耗的化學能為

$$\mathcal{E} \Delta Q = (1.5 \text{ V}) \times (30 \text{ C}) = 45 \text{ J}$$

## 7-2 電阻與歐姆定律

### 1. 電阻與歐姆定律

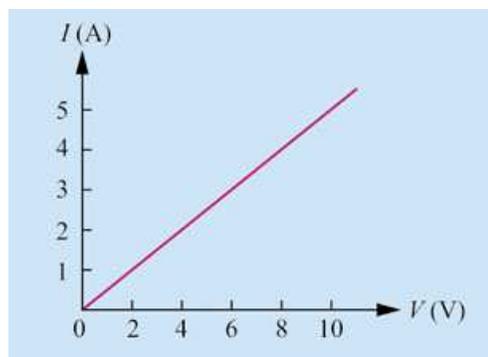
施加在物體上的電壓（即電位差）會驅動電荷移動而形成電流；將相同的電壓施加在不同的物體，若產生的電流愈小，代表該物體的導電能力愈差。我們將施加在物體兩端的電壓  $V$  和其產生電流  $I$  的比值稱為**電阻**（resistance），以  $R$  表示之，即

$$R = \frac{V}{I}$$

7-4 式

上式表示若物體的電阻  $R$  愈大，則由前述可知其導電能力愈差。電阻的 SI 單位為伏特/安培（即  $V/A$ ），稱為**歐姆**（ohm），以希臘字母  $\Omega$  表示之，故  $1\Omega = 1V/A$ 。以 1 伏特的電位差施加在物體的兩端，若流經物體的電流為 1 安培，則此物體兩端之間的電阻為 1 歐姆。

1827 年，德國物理學家歐姆（Georg Simon Ohm, 1789 - 1854）將其關於導體電阻的實驗結果發表在其著作《直流電路的數學研究》（*The Galvanic Circuit Investigated Mathematically*）。歐姆發現在溫度保持固定時，導體兩端



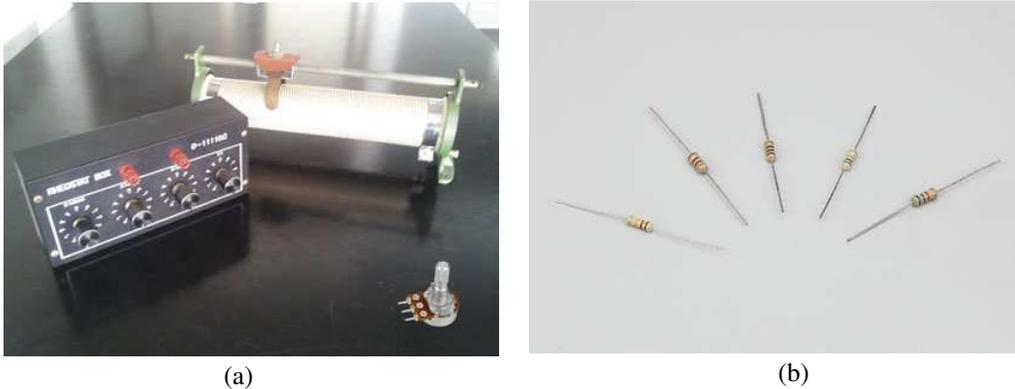
▲圖 7-7 導體符合歐姆定律時的電壓  $V$  與電流  $I$  關係曲線。

的電壓  $V$  與其所產生的電流  $I$  成正比，即（7-4）式所定義之導體的電阻  $R$  為一與電流及電壓無關之常數（圖 7-7），之後把此現象稱為**歐姆定律**（Ohm's law），即

$$\frac{V}{I} = R, R \text{ 為定值}$$

7-5 式

如圖 7-8 所示，在電路中的可變電阻或是電阻值固定的柱狀電阻等元件都符合歐姆定律，若施加在電阻兩端的電壓提升為兩倍，則所產生的電流亦升高為兩倍。在電路圖中常以符號  表示電阻，而以符號  表示可變電阻。另外有許多電路元件並不符合歐姆定律，例如真空管、二極體、電晶體等。



▲圖 7-8 (a)三種可變電阻與(b)柱狀電阻都符合歐姆

## 2.電阻率及電阻與溫度的關係

由實驗結果顯示，在溫度不變時，柱狀導體的電阻  $R$  會與導體的長度  $L$  成正比，與導體的截面積  $A$  成反比，即

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{7-6 式}$$

式中  $\rho$  稱為電阻率 (resistivity)，SI 單位為  $\Omega \cdot \text{m}$ ，其值僅和物質的種類以及溫度有關，而與物體的形狀或長度無關。在長度與截面積相同的條件下，若物體的電阻率愈大，則其電阻愈大。表 7-1 為常見物質在  $20^\circ\text{C}$  時的電阻率。

由表中可看出不同物質的電阻率相差極大。我們可根據電阻率的大小，將物質分成三組。電阻率最小的一組，其導電性較佳，稱為**導體** (conductor)，例如金、銀、銅等金屬；而電阻率最大的一組，其導電性較差，稱為**絕緣體** (insulator)，例如玻璃與石英；**半導體** (semiconductor) 的導電性則介於兩者之間，例如鍺與矽。導體中銅的

電阻率甚小，常作成導線以接通各種電器，因為其電阻通常遠小於電器本身的電阻，故此時導線的電阻可以忽略不計。

▼表 7-1 常見物質在 20 °C 時的電阻率

種類	物質	電阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	種類	物質	電阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )
導體	銀	$1.59 \times 10^{-8}$	半導體	鍺	$2.6 \times 10^{-1}$
	銅	$1.69 \times 10^{-8}$		矽	$6.4 \times 10^2$
	金	$2.21 \times 10^{-8}$		砷化鎵	$3.9 \times 10^6$
	鋁	$2.71 \times 10^{-8}$	絕緣體	木材	$10^8 \sim 10^{14}$
	鎢	$5.28 \times 10^{-8}$		玻璃	$10^{10} \sim 10^{14}$
	鐵	$9.61 \times 10^{-8}$		琥珀	$5 \times 10^{14}$
	鎳鉻絲	$1.5 \times 10^{-6}$		石英	$7.5 \times 10^{17}$
		銻錫氧化物 <sup>註</sup> (簡稱 ITO)	$\sim 10^{-6}$		

不同物質的導電性隨溫度變化的關係亦可能不相同，例如當溫度升高時，金屬導體的電阻率隨溫度升高而增大。一般金屬導體的長度與截面積隨溫度而熱膨脹的變化遠小於電阻率的變化，因此當溫度變化時，柱狀導體的長度與截面積可視為定值，而由 (7-6) 式可知，導體的電阻會隨溫度升高而增大。半導體則相反，電阻率會隨溫度升高而變小，故當長度與截面積視為定值時，其電阻隨溫度升高而減小。

### ◎ 範例 7-3

一銅製長導線，其截面積為  $0.130 \text{ mm}^2$ ，長度為  $1.50 \text{ m}$ ，在  $20.0^\circ\text{C}$  下，導線的電阻為何？

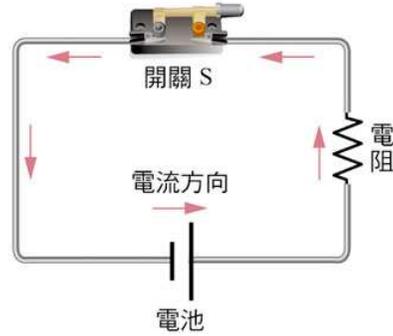
[解答] 由表 7-1 知， $20^\circ\text{C}$  時銅的電阻率為  $1.69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，利用 (7-6) 式，可得銅線的電阻  $R$  為

$$R = (1.69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}) \frac{1.50 \text{ m}}{0.130 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 0.195 \Omega$$

<sup>註</sup> 銻錫氧化物同時具備極佳的導電特性及高透光率，可製成透明的導電薄膜，覆蓋在玻璃上，可使玻璃表面導電。

### 3. 電流迴路

如圖 7-9 所示，將一個理想電池連接一個電阻，當開關 S 接通時，電流由電池的正極流出，經電阻回到電池的負極，再經由電池的內部流回到正極，保持連續的電流，形成一個簡單電流迴路，簡稱**電路**（electric circuit）。在電路中以符號  $\begin{array}{c} | \\ | \\ | \end{array} \begin{array}{c} | \\ | \\ | \end{array}$  表示電池，長線代表正極，短線代表負極。



▲圖 7-9 簡單的電流迴路，導線的電阻忽略不計。

在一穩定的電路中，電量是守恆的，電路上任何一點必無電荷之積聚、產生或消滅，故如圖 7-9 所示之簡單迴路上各元件的電流均相同。在電路中，能量也是守恆的，在圖 7-9 中，移動的電荷從電池中所獲得的電能必等於在電阻所消耗的電能，所以電阻的電壓等於電池的端電壓。此外，電路在實際應用時，往往是將數個電阻**串聯**（in series）或是**並聯**（in parallel），再接上電池而形成穩定的電流。利用電阻串聯或並聯的等效電路，可以化簡成單一電池和電阻的簡單迴路，此想法討論如下。

### 4. 電阻的串聯

若電路中有  $R_1$ 、 $R_2$  兩電阻的連結如圖 7-10(a)所示，則稱為電阻的串聯。根據電量守恆，圖中流經各個電阻的電流  $I$  均相同。根據能量守恆，電池提供的端電壓等於 a 和 c 之間的電壓  $V_{ac}$ 。電壓  $V_{ac}$  等於 a、b 間電壓  $V_{ab}$  與 b、c 間電壓  $V_{bc}$  的和，即

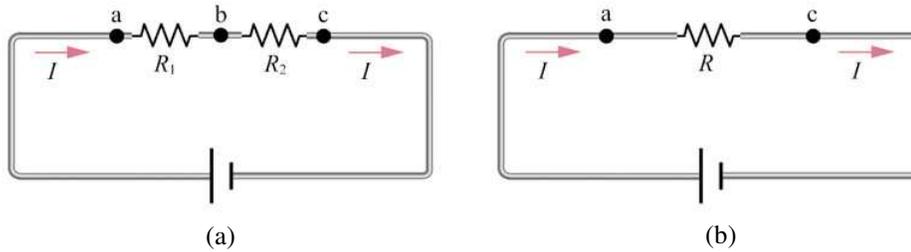
$$V_{ac} = V_{ab} + V_{bc}$$

若 a 到 c 之間的電阻以單一電阻  $R$  來表示（如圖 7-10(b)），稱為等效電阻（equivalent resistance），由關係式  $V = IR$ ，則上式可改寫為

$$IR = IR_1 + IR_2$$

即

$$R = R_1 + R_2$$



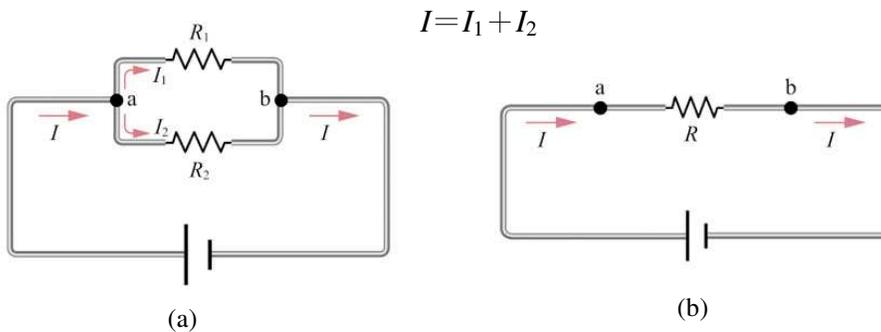
▲圖 7-10 (a)  $R_1$  與  $R_2$  兩電阻串聯；(b) 串聯電阻的等效電路， $R$  為等效電阻。

以上的結果，可以推廣至  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\dots$ 、 $R_N$  等  $N$  個串聯的電阻，其等效電阻  $R$  為

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_N = \sum_{j=1}^N R_j \quad \text{7-7 式}$$

## 5. 電阻的並聯

若電路中有  $R_1$ 、 $R_2$  兩電阻的連結如圖 7-11(a) 所示，則稱為電阻的並聯。根據能量守恆，圖中各個電阻的電壓  $V$  皆等於電池的端電壓。根據電量守恆，流經 a、b 兩點的電流  $I$  等於流經  $R_1$  的電流  $I_1$  與流經  $R_2$  的電流  $I_2$  的和，即



▲圖 7-11 (a)  $R_1$  與  $R_2$  兩電阻並聯；(b) 並聯電阻的等效電路， $R$  為等效電阻。

若以  $R$  表示由 a 到 b 的等效電阻（如圖 7-11(b)），根據  $V=IR$ ，由上式可得  $\frac{V}{R} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2}$ ，即

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

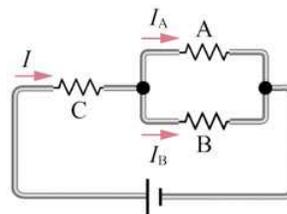
上式整理可得為  $R$  為  $\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ 。以上的結果，可以推廣至  $R_1、R_2、\dots、R_N$  等  $N$  個並聯的電阻，其等效電阻  $R$  與各電阻之間具有下列關係式。

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N} = \sum_{j=1}^N \frac{1}{R_j} \quad \text{7-8 式}$$

### 範例 7-4

如圖 7-12 所示，電路中 A、B、C 三個電阻分別為  $12\Omega$ 、 $6.0\Omega$ 、 $8.0\Omega$ ，而電池電動勢為  $36\text{ V}$ （理想電池），則

- (1) 流經電池的電流為何？
- (2) 流經 A、B 電阻的電流各為何？



▲圖 7-12

[解答] (1) A、B 電阻為並聯，其等效電阻  $R'$  為

$$R' = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B} = \frac{(12\Omega)(6.0\Omega)}{12\Omega + 6.0\Omega} = 4.0\Omega$$

再與電阻 C 串聯後，三個電阻的等效電阻  $R''$  為

$$R'' = 4.0\Omega + 8.0\Omega = 12\Omega$$

因為理想電池的電動勢  $\mathcal{E}$  等於等效電阻  $R''$  的電位差，由關係式

$V=IR$  可得此流經電池的電流  $I$  為

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R''} = \frac{36\text{ V}}{12\Omega} = 3.0\text{ A}$$

- (2) 根據電量守恆，流經電池的電流  $I$  等於流經電阻 A 的電流  $I_A$  與流經電阻 B 的電流  $I_B$  的和，即

$$I_A + I_B = 3.0\text{ A}$$

A、B 兩電阻的電位差皆相同，由關係式  $V=IR$  可知

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{R_B}{R_A} = \frac{6.0}{12} = \frac{1}{2}$$

$$\text{則 } I_A = 3.0\text{ A} \times \frac{1}{1+2} = 1.0\text{ A}, I_B = 3.0\text{ A} \times \frac{2}{1+2} = 2.0\text{ A}$$

### 範例 7-5

電池的電動勢為  $E$ ，並為一理想電池，與四個電阻值皆為  $R$  的電阻連接如圖 7-13 所示，流經電池的電流為何？

[解答] 圖 7-13 電路相當於圖 7-14 所示的電路，設在 B、C 兩點間的等效電阻為  $R_{BC}$ ，由 (7-8)

式，則  $R_{BC}$  與  $R$  的關係為

$$\frac{1}{R_{BC}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R}$$

$$\text{可得 } R_{BC} = \frac{R}{3}$$

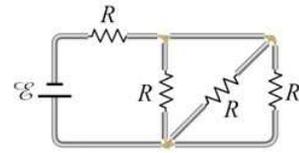
設 A、C 兩點間的等效電阻為  $R_{AC}$ ，

$$\text{由 (7-7) 式，則 } R_{AC} = R + \frac{R}{3}$$

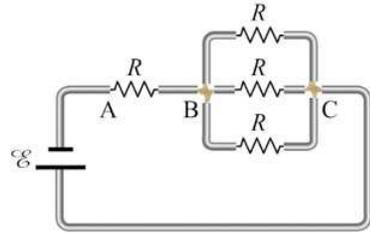
$$\text{可得 } R_{AC} = \frac{4}{3}R$$

因為 A、C 兩點間的電位差等於電池的電動勢，可得流經電池的電流為

$$I = \frac{\mathcal{E}}{\frac{4}{3}R} = \frac{3\mathcal{E}}{4R}$$



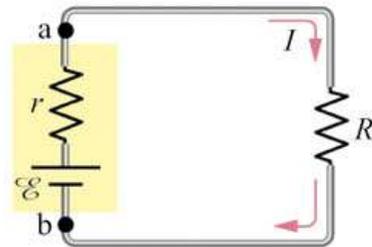
▲圖 7-13



▲圖 7-14

## 6. 電池的電動勢與端電壓

當電池接通外電路時，在電池的內部，電流由負極流向正極的過程中，因為電池內部也具有電阻，所以會消耗一部分能量，該電阻稱為內電阻。圖 7-15 所示為具有內電阻之實際電池的等效電路，在圖中，實際電池相當於由一電動勢  $E$  的理想電池串聯一內電阻  $r$  組成。



▲圖 7-15 圖中實際電池的等效電路，相當於一電動勢為  $E$  的理想電池串聯一內電阻  $r$ 。

若外電路的總電阻為  $R$ ，流經電池內部的電流為  $I$ ，根據能量守恆，電池的電動勢  $\mathcal{E}$  等於內電阻  $r$  與外電路總電阻  $R$  的電壓總合，即  $\mathcal{E} = Ir + IR$ ，故電池的端電壓  $V_{ab}$  為

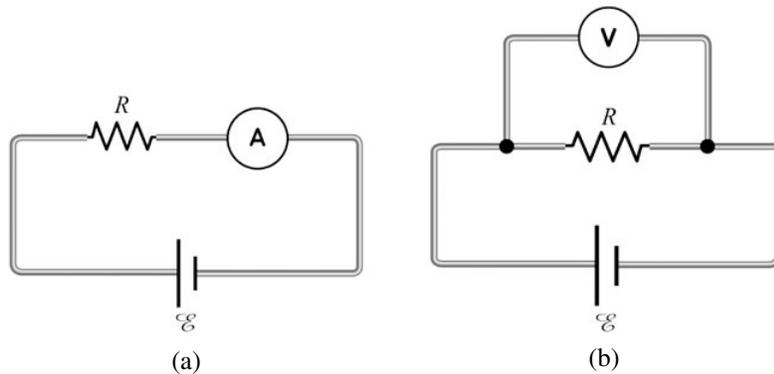
$$V_{ab} = \mathcal{E} - Ir = IR$$

7-9 式

電池的內電阻並非定值，它隨電池內部化學能的消耗而變大。因此當電池用久後，其內電阻增大而端電壓減小。

## 7. 安培計、伏特計與三用電表

測量電流的儀表稱為電流計或安培計，使用安培計時，必須與待測電路串聯，如圖 7-16(a) 所示，電路圖中常以  $\textcircled{A}$  表示安培計。測量電壓的儀表則稱為電壓計或伏特計，使用伏特計時，須與待測電路並聯，如圖 7-16(b) 所示，電路圖中常以  $\textcircled{V}$  表示伏特計。在實驗室中，我們可以使用三用電表來測量電壓、電流、電阻，所以一台三用電表就可以提供伏特計或是安培計的功能了。



▲圖 7-16 (a)使用安培計時，必須和待測的電路串聯；  
(b)使用伏特計時，必須和待測的電路並聯。



### 想一想

測量電流時，為何安培計需與待測電路串聯？測量電壓時，為何伏特計需與待測電路並聯？

三用電表一般都具有交流電壓（ACV）與直流電壓（DCV）的測量、交流電流（ACA）與直流電流（DCA）的測量，以及電阻測量等基本功能。圖 7-17 所示為兩種在市面上常見的機型，即數位和類比兩種，其探針有紅色與黑色兩根供測量使用。類比型三用電表，其原理是當電流通過線圈時，會使線圈在磁場中偏轉，利用附著在線圈上的指針所偏轉的角度，以指示電流的大小，我們在下一章中將有詳細的說明。



▲圖 7-17 (a)數位型的三用電表；(b)類比（指針）型的三用電表。

如圖 7-18(a)所示，在測量電流時，類似於安培計的使用方法，需將旋轉開關轉至 DCA 區域，將黑色探針插入“COM”插座，紅色探針插入“mA”插座（待測電流大於 200 mA 則插入 20 A 插座），兩根探針與電路待測處作串聯。

如圖 7-18(b)所示，在測量電壓時，類似於伏特計的使用方法，需將旋轉開關轉至 DCV 區域，將黑色探針插入“COM”插座，紅色探針插入“V/ $\Omega$ ”插座，兩根探針與電路上待測的兩端作並聯。

三用電表在測量電阻時，必須將待測物自線路中取下，單獨測量其電阻值，切不可在接通的線路上直接測量。如圖 7-18(c)所示，將旋轉開關轉至  $\Omega$  區域，將黑色探針插入“COM”插座，紅色探針插入“V/ $\Omega$ ”插座，而將三用電表的兩根探針分別與待測電阻的兩端接觸。



▲圖 7-18 使用三用電表(a)測量電流；(b)測量電壓；(c)測量電

### 做一做

使用三用電表測量電池的電壓，並讀取其標示值做比較，和同學討論觀察所得結果。



### 想一想

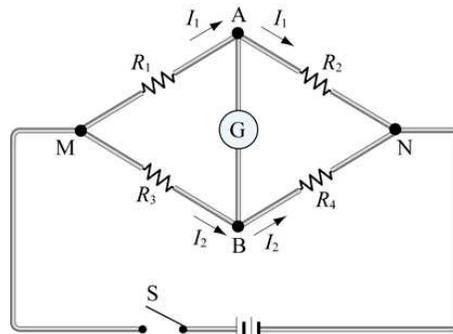
如圖 7-19 所示，將小夜燈插頭插在插座卻不發光，可能燈泡本身的鎢絲斷掉，可能插座故障無法供電，也可能是燈座與插頭間形成斷路，或是插頭與插座接觸不良。請設計方法利用三用電表檢查所有可能原因（原因可能不只一種）。



▲圖 7-19

## 8. 惠司同電橋

惠司同電橋是一種常用來測量未知電阻的電路，其線路連接如圖 7-20 所示，圖中  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  與  $R_4$  分別為四個電阻， $G$  為檢流計。當開關  $S$  接通時，若檢流計的讀數為零，則  $A$  和  $B$  兩點之間的電位差



▲圖 7-20 以惠司同電橋測量電阻。

為零。此時流經  $R_1$  與  $R_2$  的電流也相同，以  $I_1$  表示之；另一方面，流經  $R_3$  與  $R_4$  的電流也應相同，以  $I_2$  表示之。由於  $A$ 、 $B$  兩點的電位相等，故電壓  $V_{AM}$  等於電壓  $V_{BM}$ ，以及電壓  $V_{AN}$  等於電壓  $V_{BN}$ ，由關係式

$V=IR$ ，分別可得

$$I_1 R_1 = I_2 R_3 \quad \text{7-10 式}$$

$$I_1 R_2 = I_2 R_4 \quad \text{7-11 式}$$

整理 (7-10) 式與 (7-11) 式，可得

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad \text{7-12 式}$$

若  $R_2$  為待測電阻，當其他三個電阻  $R_1$ 、 $R_3$  和  $R_4$  為已知時，則可利用 (7-12) 式求得電阻值  $R_2$ 。

## 範例 7-6

分別將  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  及  $R_4$  等四個電阻與電動勢

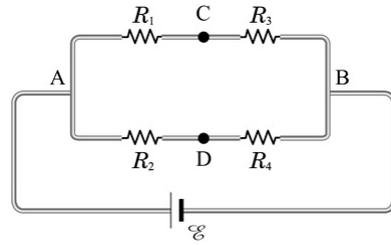
$E=10\text{ V}$  的理想電池電池連接如圖 7-21，試問：

(1) 設  $R_1=40\Omega$ ， $R_2=480\Omega$ ， $R_3=160\Omega$ ，若

C 與 D 兩點的電位差為零，則電阻  $R_4$  為何？

(2) 承題(1)，當  $R_1$ 、 $R_2$  與  $R_3$  維持不變，電阻

$R_4=160\Omega$ ，則 C 與 D 兩點的電位差  $V_C-V_D$  為何？



▲圖 7-21

[解答] (1) 若 C 與 D 兩點的電位差為零，根據惠司同電橋原理，則  $R_1R_4=R_2R_3$ ，得電阻  $R_4$  為

$$R_4 = \frac{R_2R_3}{R_1} = \frac{(480\Omega)(160\Omega)}{(40\Omega)} = 1920\Omega$$

(2) 由  $V=IR$ ，流經 ACB 的電流  $I_1$  與流經 ADB 的電流  $I_2$  分別為

$$I_1 = \frac{E}{R_1+R_3} = \frac{10\text{ V}}{40\Omega+160\Omega} = \frac{1}{20}\text{ A}$$

$$I_2 = \frac{E}{R_2+R_4} = \frac{10\text{ V}}{480\Omega+160\Omega} = \frac{1}{64}\text{ A}$$

C 與 B 的電位差及 D 與 B 的電位差分別為

$$V_C - V_B = I_1R_3 = \left(\frac{1}{20}\text{ A}\right)(160\Omega) = 8\text{ V} \quad \text{①}$$

$$V_D - V_B = I_2R_4 = \left(\frac{1}{64}\text{ A}\right)(160\Omega) = 2.5\text{ V} \quad \text{②}$$

根據①式及②式，C 與 D 的電位差為

$$V_C - V_D = (8\text{ V} + V_B) - (2.5\text{ V} + V_B) = 5.5\text{ V}$$

當惠司同電橋上的四個電阻彼此間有適當的比例關係，方能使 C、D 兩點的輸出電壓為零；若是電橋上的某個電阻（例如  $R_4$ ）因為形變而產生電阻變化，則 C、D 兩點的電壓不為零，利用 C、D 兩點的電壓輸出可推得電阻的變化量，此性質被應用在電子感測器的設計。

## 7-3 電流的熱效應與電功率

在生活周遭常見許多電器用品，例如電風扇通電後，風扇轉動吹來涼風；開啟音響設備，美妙的音樂由喇叭播放出來；吹風機通電後，送出的熱氣可以快速吹乾溼漉漉的頭髮。在享受電器用品所帶來便利的同時，我們也要付出消耗電能的代價。

### 1. 電源與電器的電能和電功率

當電流從電源內部的負極流至正極，電源會提供能量給流過的電荷。考慮一理想電池，若通過電池內部的電流為  $I$ ，則相當於在  $\Delta t$  時間內，流經電池正負兩極的電荷電量  $\Delta Q$  為

$$\Delta Q = I \Delta t$$

設電池的電動勢為  $\mathcal{E}$ ，由上式可知電池提供的電能  $\Delta U_e$  為

$$\Delta U_e = \mathcal{E} \Delta Q = \mathcal{E} I \Delta t$$

若電池每單位時間（例如每秒）提供的電能稱為電池的供電功率  $P$ ，由上式可知電池的供電功率  $P$  為

$$P = \frac{\Delta U_e}{\Delta t} = \frac{\mathcal{E} \Delta Q}{\Delta t} = \mathcal{E} I \quad \text{7-13 式}$$

電功率常用的單位為瓦特（watt，或稱為瓦，符號為  $\text{W}$ ）或是千瓦（即  $1000 \text{ W}$ ，簡記為  $\text{kW}$ ）。若理想電池的電動勢  $\mathcal{E}$  為 3 伏特，當通過電流  $I$  為 1 安培，則電池的供電功率  $P$  為 3 瓦，即每秒供電能 3 焦耳。

相反地，電器是一種消耗電能而轉變成其他能量形式的裝置，例如電風扇內部馬達將電能轉換成扇葉轉動的力學能、喇叭將電能轉換成聲音能量、吹風機將電能轉換成熱能及熱風的動能。設電器兩端的電壓為  $V$ ，若通過電器的電流為  $I$ ，在  $\Delta t$  的時間內流經電器的電量  $\Delta Q$  為  $I \Delta t$ ，則這些電荷所消耗的電能  $\Delta W$  為

$$\Delta W = V \Delta Q = VI \Delta t$$

因此電器的耗電功率  $P$  為

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{V \Delta Q}{\Delta t} = VI$$

7-14 式

家用電器上黏貼的標籤會標示該電器在額定電壓下所消耗的電功率，若某款數位相機上黏貼標籤如圖 7-22 所示，表示使用額定電壓 3.6 伏特的直流電源，相機消耗功率為 1.0 瓦，由 (7-14) 式可知道流經相機的電流約為 0.28 安培。

產品名稱：數位相機  
型號：XXX-YY  
額定電壓：DC 3.6 V  
消耗功率：1.0 W  
製造年份：2014  
產地：Made In Taiwan

▲圖 7-22 數位相機標籤



### 電池容量

電池能夠提供的電能稱為電池容量，若將標示「3.7 V 3.55 Wh」的電池（圖 7-23）接上耗電功率 3.55 W 的電器，在理想狀況下，則該電器可以連續使用 1 h（小時）；若接上耗電功率一半（即 1.725 W）的電器，則使用時間增為原來兩倍（即 2 h）。



▲圖 7-23 電池容量

電功率  $P$  愈大的電器，表示單位時間內消耗的電能愈多，若電器使用的時間為  $\Delta t$ ，則消耗電能  $\Delta W = P \Delta t$ 。家庭中所裝設的電度表，是用以記錄家庭所耗電能的裝置。電度表每增加 1 度電能，等於以 1 千瓦的電功率累計用電 1 小時所消耗的電能（簡記為 1 千瓦小時），即  $1 \text{ 度} = 1 \text{ 千瓦小時} = (1000 \text{ J/s}) \times (3600 \text{ s}) = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$ 。



### 做一做

下課時間若能將教室裡的日光燈關掉，同學至戶外走走，不僅能紓解上課時緊繃的身心，也能節約能源。設下課時間為 10 分鐘，每天共有 6 次下課時間，若下課時間將日光燈全部打開，請查閱教室所有日光燈的功率，並計算 22 天（約一個月的上課天數）因此而消耗的電能度數為多少？

## 2.電流的熱效應

家庭中有些電器是將電能大部分轉換成熱能，以達到工作目的，例如電熨斗、電鍋（圖 7-24）、電暖爐，其核心材料大抵是以鎳鉻合金為主的導體電阻。電流流經電阻時，電荷所減少的電能轉換成電阻的熱能，使電阻的溫度升高，此現象稱為**電流的熱效應**。從微觀來看，這是由於電荷在電阻內移動過程中會與導體中的原子碰撞，電荷將由電源獲得的能量移轉給原子，使原子的動能增加。傳統電燈泡也是電流熱效應的應用，其燈絲常用鎢絲製成，當通以電流時因為溫度增至極高而發光，但是因電能轉換成光能的效率不佳，近來已逐漸淘汰。



▲圖 7-24 當電流通過電鍋內的電阻時，由電能轉換的熱能可以加熱食物。

對電阻值為  $R$  的電阻而言，若是其消耗的電能可以完全轉換成熱能，當電阻兩端的電壓為  $V$ ，且流經電阻的電流為  $I$ ，由（7-14）式與電阻的定義（即（7-4）式），則其發熱功率  $P$  可表示為

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

7-15 式

上述關係式又稱為**焦耳定律**（Joule's law）。由上式可知，若電阻遵守歐姆定律，即電阻值  $R$  不隨電壓與電流改變，流經導線上的電流愈大時，其發熱功率也愈大。鎳鉻絲的電阻率比起銅導線來得大，相同的電流經過鎳鉻絲時，較容易發高熱。某些電器用品如電風扇的轉動馬達，在通電後的運轉過程中，也會產生熱能，一般將其消耗電能而產生熱能的等效電阻稱為馬達的內電阻。



### 想一想

發電廠供電時，常以高電壓輸出以減低其電流，請利用（7-15）式解釋為何減低傳輸電流可減少在漫長傳輸線上所耗損的電能？另外，若某同學想利用（7-15）式中的電壓  $V$  來說明傳輸線上所耗損的電能，則其使用的  $V$  為何處之電壓呢？

在使用電器用品時，連接電器與電源的導線也會發熱，為了避免導線過熱，每條導線都有其最大的安全電流容量。有時我們需要使用延長線（圖 7-25）來增加電源的插座，若延長線的最大安全電流為 15 安培，則要注意的是，並不是每個插座可以用到 15 安培，而是指在同一時間所有插座使用電流的總和不得超過 15 安培。當圖 7-25 中的多孔插座同時連接電鍋和烤箱，因這兩個電器並聯，故電壓皆相同。兩電器並聯時，流經延長線與電源間的電流  $I$  等於流經兩電器的電流  $I_1$  與  $I_2$  的和。



▲圖 7-25 多孔插座雖可供數個電器同時使用，但總電流  $I$  不能超過該插座所容許的最大安全電流。 $I_1$  與  $I_2$  分別為電器的電流， $I=I_1+I_2$ 。

### 範例 7-7

如圖 7-26 所示的電路，若電池的電動勢為 1.5 V，內電阻為  $2.0\Omega$ ，外接的電阻  $R$  為  $13\Omega$ ，則



▲圖 7-26

- (1) 整個電路中的電流為何？
- (2) 電池的供電功率為何？
- (3) 20 分鐘內，電阻  $R$  消耗的電能為何？

[解答] (1) 設電流為  $I$ ，由  $V=IR$  知內電阻的電位差為  $I \times 2.0\Omega$  與外接電阻的電位差為  $I \times 13\Omega$

電池的電動勢等於內電阻的電位差與外接電阻的電位差之和，則

$$1.5 \text{ V} = I (2.0\Omega) + I (13\Omega)$$

解得整個電路的電流  $I=0.1 \text{ A}$

- (2) 電池的供電功率  $P$  為電阻  $R$  的耗電功率，由 (7-15) 式，則

$$P = I^2 R = (0.1 \text{ A})^2 (13\Omega) = 0.13 \text{ W}$$

- (3) 在  $\Delta t$  為 20 分鐘的時間內，電阻  $R$  所消耗的電能為  $\Delta W$ ，由 (7-14) 式，則

$$\Delta W = P \Delta t = (0.13 \text{ J/s}) (20 \times 60 \text{ s}) = 156 \text{ J}$$

若電流  $I$  超過延長線標示的最大安全電流容量，此即所謂的過電流，又稱超載，將會造成過熱而發生危險。為避免意外，電路上均裝有保險絲或是無熔絲開關，當發生過電流（超載）時，保險絲會熔斷，無熔絲開關則會自動彈開，使電路形成斷路。此時應該檢查是否牆壁上的插座同時使用了幾個功率較大的電器產品，或是在一條延長線的插座上同時使用多個電器產品，確保不會再有電流超載之虞，再接通保險絲開關繼續用電。

### 範例 7-8

在日照充足的地方，有些房子的屋頂裝置有太陽能熱水器，可以吸收太陽輻射熱能，加熱儲熱桶內的水。太陽能熱水器通常也會安裝電熱元件，因應日照不足的季節或是陰暗的天氣，可以靠通電來加熱水。在裝有 300.0 公斤的水之絕熱容器中有電阻值為 10.00 歐姆的電熱元件，當電熱元件連結 110.0 V 的電壓，若消耗的電能有 83.72% 轉換成被水吸收的熱，則 1 小時後，水溫升高多少  $^{\circ}\text{C}$ ？（水的比熱為  $1.000 \text{ cal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ， $1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$ ）

[解答] 由 (7-15) 式，當  $10.00 \Omega$  的電阻  $R$  連接 110.0 V 的電壓  $V$ ，則電阻的電功率  $P$  為

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(110.0 \text{ V})^2}{1000 \Omega} = 1210 \text{ W}$$

在  $\Delta t$  為 1 小時的時間內，電阻  $R$  所消耗的電能為  $\Delta W$ ，由 (7-14) 式，則

$$\begin{aligned} \Delta W &= P \Delta t \\ &= (1210 \text{ J/s})(1 \times 60 \times 60 \text{ s}) = 4.356 \times 10^6 \text{ J} \end{aligned}$$

由上式可知，在 1 小時的時間內，計有  $4.356 \times 10^6 \text{ J} \times 83.72\%$  轉換成被水吸收的熱  $\Delta Q$ 。當質量  $m$  的水吸收熱  $\Delta Q$ ，溫度升高  $\Delta T$ ，若水的比熱為  $s$ ，由  $\Delta Q = m \times s \times \Delta T$ ，則

$$\begin{aligned} &4.356 \times 10^6 \text{ J} \times 83.72\% \\ &= (300.0 \times 10^3 \text{ g})(1.000 \text{ cal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}) \Delta T (4.186 \text{ J/cal}) \end{aligned}$$

所以  $\Delta T = 2.904 \text{ }^{\circ}\text{C}$

### 7-1 電動勢與電流

1. 若在導線兩端施加固定的電位差，則導線內將產生一沿著導線方向從高電位指向低電位的電場。自由電子集體從低電位移向高電位，因而形成導體中的電流。
2. 規定正電荷流動的方向為電流的方向。
3. 在  $\Delta t$  的時間間隔內，通過導體內某一截面的總電量為  $\Delta Q$ ，則在此段時間內通過此截面的平均電流  $I_{av} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ 。
4. 電流的 SI 單位制為庫侖/秒（即 C/s），稱為安培（ampere，以 A 表示）。
5. 電源在其內部具有持續使電流由低電位移動至高電位的能力，稱為電源的電動勢  $E$ 。電池是一種利用化學反應產生固定電動勢的直流電源。
6. 電荷  $q$  由電池的負極移至正極時，電池提供電荷的能量為  $W$ ，則電池的電動勢  $E = \frac{W}{q}$ 。電動勢的 SI 單位為焦耳/庫侖（即 J/C），也是伏特（V）。
7. 當電池對外接線路供電，若電池具有內電阻，因為有一部分電池提供的能量會被損耗成熱，則電池的端電壓會小於電動勢。

### 7-2 電阻與歐姆定律

8. 施加在物體兩端的電壓  $V$  和其產生電流  $I$  的比值稱為電阻  $R$ ，即  $R = \frac{V}{I}$ 。
9. 電阻的 SI 單位為伏特/安培（即 V/A），稱為歐姆（ohm），以希臘字母  $\Omega$  表示之。
10. 在溫度保持固定時，導體的電阻  $R$  為定值，即導體兩端的電壓  $V$  及流過的電流  $I$  成正比，稱為符合歐姆定律的導體。
11. 在溫度不變時，柱狀導體的電阻  $R$  會與導體的長度  $L$  成正比，與導體的面積  $A$  成反比，即  $R = \rho \frac{L}{A}$ ， $\rho$  為電阻率。
12. 電阻率  $\rho$  的 SI 單位為  $\Omega \cdot \text{m}$ ，其值僅和物質的種類以及溫度有關，而與物體的形狀或長度無關。
13. 當溫度升高時，金屬導體的電阻率隨溫度升高而增大；半導體的電阻率會隨溫度升高而變小。
14. 在一穩定的電流迴路中，電量與能量是守恆的。

15.  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\dots$ 、等  $N$  個串聯的電阻，其等效電阻

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_N = \sum_{j=1}^N R_j。$$

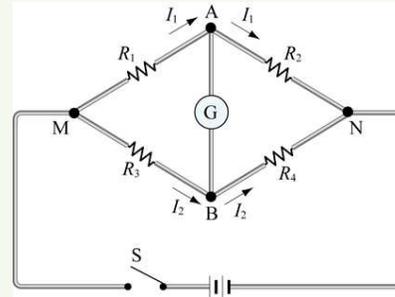
16.  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\dots$ 、等  $N$  個並聯的電阻，其等效電阻  $R$  的倒數

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N} = \sum_{j=1}^N \frac{1}{R_j}。$$

17. 使用安培計測量電路中的電流時，必須與待測電路串聯；使用伏特計測量電路中的電壓時，須與待測電路並聯。

18. 三用電錶同時具有測量交直流電壓、交直流電流，以及電阻測量等基本功能。

19. 利用惠司同電橋可以精確測量未知電阻，其線路連接如圖 7-27 所示。當開關  $S$  接通時，調整可變電阻  $R_2$ ，使檢流計  $G$  的讀數為零，可



得待測電阻  $R_1 = \frac{R_2 R_3}{R_4}$ ，式中

的  $R_3$  和  $R_4$  為已知電阻。

## 7-3 電流的熱效應與電功率

20. 內電阻不計的電池的電動勢為  $E$ ，通過電池的電流為  $I$ ，電池的供電功率

$$P = \mathcal{E}I。$$

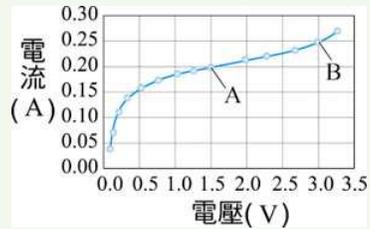
21. 對電阻  $R$  的電器而言，若是其消耗的電能可以完全轉換成熱能，當電阻兩端的

電壓為  $V$ ，且流經電阻的電流為  $I$ ，則其發熱功率  $P = VI = I^2 R = \frac{V^2}{R}$ 。

22. 電路上均裝有保險絲或是無熔絲開關，當發生過電流（超載）時，保險絲會熔斷，無熔絲開關則會自動彈開，使電路形成斷路。

## 一、問答題

1. 導體兩端加上電位差，內部便產生電場使自由電子加速，但何以電流不會愈來愈大？
2. 一條導線上某兩點間等電位，則其間必無電流，對嗎？
3. 圖 7-28 為某電子元件的電壓對電流的關係圖，請計算圖中 A、B 兩點的電阻值。該元件是否符合歐姆定律？
4. 為何乾電池僅標示電壓，卻不標示電流呢？
5. 下列對於金屬的電阻與電阻率變化之敘述，何者正確？ (A)相同材質相同截面積的兩金屬線較長的金屬線有較大的電阻 (B)相同材質相同截面積的兩金屬線，較長的金屬線有較大的電阻率 (C)將金屬的溫度升高，則電阻增大 (D)將金屬的溫度升，則電阻率增大
6. 長度相同但是粗細不同（即截面積不同）的鎳鉻線電阻，分別接上相同的電池，何者電池的壽命較短？
7. 110 V、60 W 的燈泡與 110 V、100 W 的燈泡串接在一 110 V 的電源上，試比較兩者之電流、端電壓及發熱功率？
8. 家庭電器的使用何以均採用並聯而不採用串聯？
9. 使用三用電表測量電壓或電流時，應如何選擇電表上的測量檔，才能正確讀取測量讀數？



▲圖 7-28

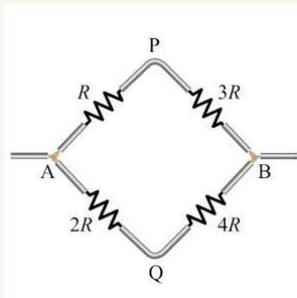
## 二、計算題

### 7-1 電動勢與電流

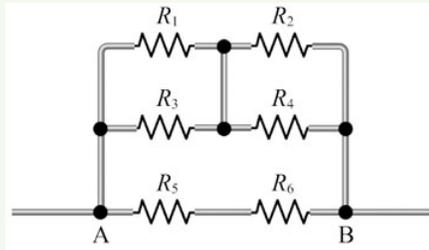
10. 一電阻兩端接在電動勢為 1.5 V 的電池兩端，若不計電池內電阻，則 2.0 庫侖的自由電子從電池正極到負極時，其電位能變化為何？
11. 在最簡化的近似中我們可以將氫原子想像成一個電子繞著質子作圓周運動，並且仍沿用氫原子中的電子與質子之間的庫侖力作為電子環繞質子的向心力。若電子的軌道半徑為 0.053 nm，根據計算可知其環繞頻率為  $6.6 \times 10^{15}$  Hz，則電子環繞質子時，其軌道電流有多大？

## 7-2 電阻與歐姆定律

12. 請參考表 7-1，直徑 2.0 mm 的銅導線，在 20 °C 時每公尺長的電阻為何？
13. (1)  $n$  條完全相同的均勻電阻線，全部串聯起來與全部並聯起來的等效電阻之比值為何？
- (2) 將一段電阻為  $R$  的電阻線剪成三段，各段電阻為何？將各段並聯後等效電阻為何？
14. 電阻值分別為  $R$ 、 $2R$ 、 $3R$  及  $4R$  的四個電阻連結如圖 7-29，試問
- (1) A、B 兩點的等效電阻為何？
- (2) 若將 P、Q 兩點以導線連接，且導線電阻不計，則 A、B 兩點的等效電阻為何？

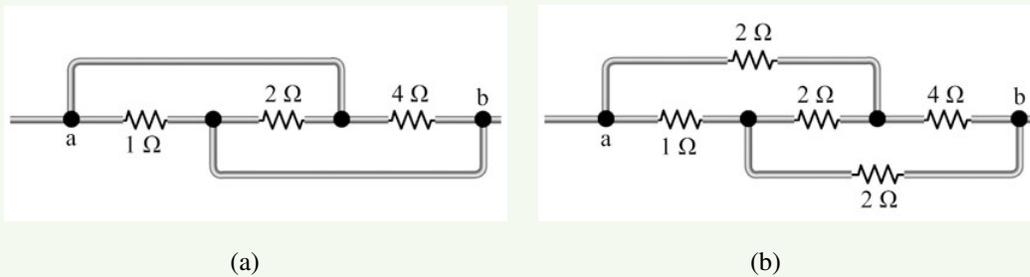


▲圖 7-29



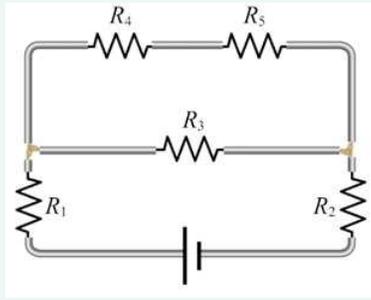
▲圖 7-30

15. 圖 7-30 中， $R_1=15\Omega$ ， $R_2=12\Omega$ ， $R_3=10\Omega$ ， $R_4=6.0\Omega$ ， $R_5=9.0\Omega$ ， $R_6=6.0\Omega$ ，則 A、B 兩點間的等效電阻為何？
16. 如圖 7-31 所示，求(a)(b)兩圖中 a 和 b 兩點之間的等效電阻。注意：請利用惠司同電橋的性質解圖的等效電阻。

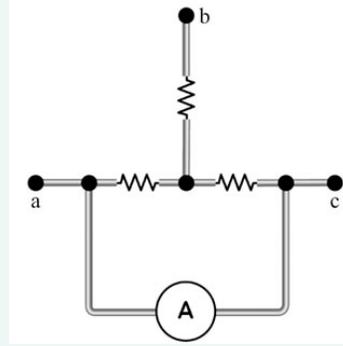


▲圖 7-31

17. 圖 7-32 中，電池電動勢為  $12\text{ V}$ ， $R_1=R_4=3\ \Omega$ ， $R_2=R_5=1\ \Omega$ ， $R_3=4\ \Omega$ ，則流經各個電阻的電流為何？（電池內電阻不計）

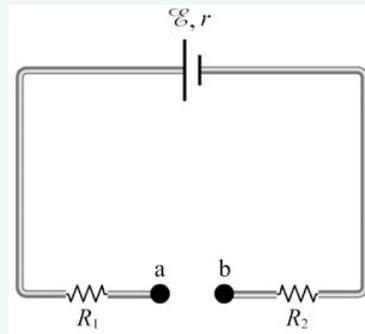


▲圖 7-32



▲圖 7-33

18. 圖 7-33 中有三個電阻，每個電阻都是  $2.0\ \Omega$ ，安培計的內電阻不計。若在  $b$  和  $c$  兩點之間加上  $6.0\text{ V}$  的固定電壓，則安培計的讀數為何？
19. 如圖 7-34 所示，電池的電動勢  $\mathcal{E}=12\text{ V}$ ，內電阻為  $1.0\ \Omega$ ，兩電阻線的電阻分別為  $R_1=7.0\ \Omega$  和  $R_2=4.0\ \Omega$ ，則

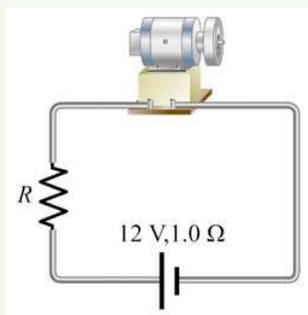


▲圖 7-34

### 7-3 電流的熱效應與電功率

20. 電動勢為  $1.50\text{ V}$  的乾電池，其內電阻為  $0.10\ \Omega$ ，若連接一電阻時，其電流為  $0.60\text{ A}$ ，則
- (1) 此電阻的電阻值為何？
  - (2) 電池的端電壓為何？
  - (3) 電池消耗化學能的功率為何？
  - (4) 電阻消耗電能的電功率為何？
21. 有一電鍋規格為  $110\text{ V}$ 、 $800\text{ W}$ ，煮一次飯約需  $15$  分鐘，則
- (1) 煮飯時，流經電鍋的電流為何？
  - (2) 每煮一次飯，約需幾度電能？

22. 圖 7-35 中，電池的電動勢為  $12\text{ V}$ ，內電阻為  $1.0\ \Omega$ ，馬達內電阻為  $2.0\ \Omega$ ，另串聯  $5.0\ \Omega$  的電阻  $R$ ，其端電壓經測量得知為  $2.0\text{ V}$ ，則



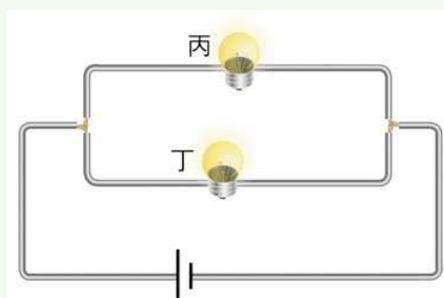
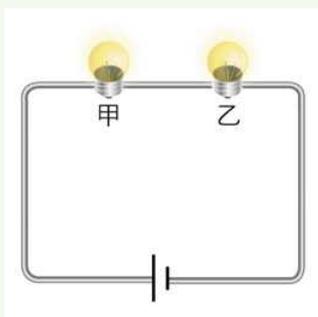
▲圖 7-35

(1) 電池的端電壓為何？

(2) 馬達的輸出功率為何？

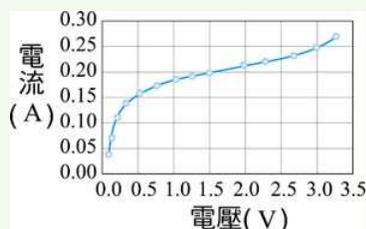
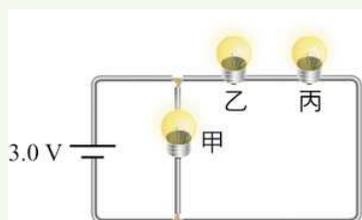
23. 一個電燈泡接上  $100\text{ V}$  的電源，通過的電流為  $1.0\text{ A}$ 。如果將該燈泡使用  $50$  分鐘所消耗的電能，完全轉換為力學能時，約能將多少瓶  $1.0\text{ kg}$  的飲料抬上離地  $4.0\text{ m}$  高的二樓？（重力加速度為  $10\text{ m/s}^2$ ）

24. 如圖 7-36 所示，有四個燈泡，其中甲和丙的規格相同，都是  $110\text{ V}$ 、 $100\text{ W}$ ；乙和丁的規格相同，都是  $110\text{ V}$ 、 $10\text{ W}$ 。所接的電源都是  $110\text{ V}$ 。若假設燈泡的電阻是常數，則這四個燈泡耗電功率大小順序是什麼？



▲圖 7-36

25. 如圖 7-37(a)所示的電路，甲、乙和丙為三個相同的小燈泡。已知小燈泡的電流與電壓的關係如圖 7-37(b)所示，則甲與乙燈泡所消耗的電功率各為何？



(a)

(b)

▲圖 7-37