



敬愛的老師您好：

PDF 檔僅限學校教師搭配紙本教材用於
課堂教學，並未授權其他用途！！

優質好書 · 盡收眼底

 **台科大圖書**

since 1997 用心出版每一本好書



tkdbooks.com

書籍配套 · 軟硬兼俱

 **紅動創新**



<http://ipoemaker.com/>

前進專業 · 淬煉身價

勁園科技教育

== Jin Yuan TechEdu ==



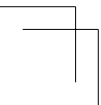
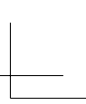
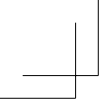
<http://jytechedu.com/>

研習競賽 · 沒有問題

iPOE 活動網
Intelligent · Public · Open · Easy-learning Event Platform



<http://pacme.asia/>



編輯大意

- 一、本書係依據民國 101 年教育部函動力機械群科中心學校之『基礎電子學』課程綱要所編輯。
- 二、本書為全一冊，供汽車科、重機科、農業機械科及飛機修護科等第二學年第一學期，每週 1 節，共 1 學分之教學用書。
- 三、本書為電子概論與實習之先修課程，及銜接基礎電工學之應用課程。全書共 3 章，第 1 章介紹及說明電壓與電流之關係的特性曲線、電壓與電流放大之等效電路，及等效電路間之互換。第 2 章介紹電路之波形值，及其間之相對關係和數學式的應用。第 3 章介紹半導體之特性，與二極體的形成，及二極體之製造。全書對於電學的概念，作一番深入的詮釋；對於電子學的基本元件，也有詳實的說明和提示，期勉在簡單、詳盡、周延下，提供學習者系列完善的教材。
- 四、本書各節之隨堂練習，及每章後之課後習題，可評量出學習者之學習成效，以供教學之參考。
- 五、本書備有輔助教學教材，如習作本及測驗卷等配套，作為教學之提示及說明。
- 六、本書備有教師手冊，內有教學重點供教學研討，歷屆試題作為命題及教學的參考。
- 七、本書編寫期間，承蒙各位先進不吝指正及審校，謹此致謝。
- 八、本書雖經多次校對與修正，然疏漏之處，恐在所難免，尚請各位先進不吝指正為幸。

序

電腦普及發展及廣泛的應用，推動動力機械走入 *e* 時代的領域。動力機械以電腦作為控制組件，不但減少及減輕機件呆重的體型與操作，同時也增進機械操作的精準性。瞭解及研究電腦之原理及使用，成為不可避免的學程。觀察組成電腦之基本原理，不外是以基本電學及電子學作為基石，再往邏輯電路與微處理機上發展和運用。

在日常生活中，常聯想電器用電是以並聯方式連接，路燈因需較大電流是以串聯方式連接，計費家庭用電的度數，是以仟瓦小時計算，為何電路短路會引起過熱釀成火災等，這些都是電學的基本概念及運用領域。

汽車方向燈之顯示或閃爍，是無穩態電路之呈現，倒車之位置或障碍物之偵測，是感測電路的應用，前後 LED 車燈之發光，是運用二極體基本結構之結果等。運用電子學之原理製成之成品，逐漸取代耗電耗材之過去產品，是世代更迭的結果，也是人類追求更便利、更精細之價值觀的提昇。

因此，應用 *e* 時代的產品，在我們所學之領域，是不可阻斷的趨勢，是必然的結果。具體而言，電子學電路之瞭解與計算，必須以基本電學作為基礎。第 1 章應用電學基本理論之歐姆定律，探討電壓源與電流源之電壓與電流之特性，以瞭解固定或變動之電源對供應電路之電流的影響。認識放大電路之型態，可以表達及計算電路之放大倍數，同時，不同型態之放大電路，可以相互轉換。第 2 章說明基本電子呈現之各種波形的種類和特性，與波形值間的計算及相互轉換。第 3 章講解基本電子元件之結構 – 半導體。由半導體之形成、特性及組成之二極體，都有明確及簡單的介紹及說明。最後介紹二極體的製造，讓學習者瞭解二極體製造過程之繁複及設備的龐大。

學習是一段心路歷程。這段歷程本著學習者的理念，以建立正確的學習態度，及正確觀念的養成。人生到處都是磨鍊，所謂 " 磨鍊才是人生 "。萬望學習者可以本著想學好、學會的心情及精神，踏入電學之領域，事事求是，多看、多想、多請教、多動手，以精益求精的態度，習得電子方面之能力，這才是編寫此書的初衷。

Contents

目錄

第1章 電子電路基本理論

1-1	電壓源 $V-I$ 特性及其內阻	1-2
1-2	電流源 $V-I$ 特性及其內阻	1-7
1-3	電阻 $V-I$ 特性，電容頻率特性	1-12
1-4	電壓放大器等效電路、電流放大器等效電路	1-23
1-5	戴維寧定理與諾頓定理	1-29
	重點掃描	1-35
	課後習題	1-37

第2章 波 形

2-1	直流與交流	2-2
2-2	正弦波	2-7
2-3	方 波	2-26
2-4	脈 波	2-32
	重點掃描	2-37
	課後習題	2-40

Contents

第 3 章 半導體

3-1 半導體的特性	3-2
3-2 P 型半導體	3-10
3-3 N 型半導體	3-16
3-4 二極體製造	3-19
重點掃描	3-29
課後習題	3-31

附 錄

一、習題簡答	附 - 2
二、三角函數對照表	附 - 5
三、應用積分數學式求解弦波之平均值	附 - 6

第

1

章

電子電路基本理論

電子電路之基本理論，應是基本電學進一步的運用。歐姆定律是電學的基本理論，有關電路之計算，都是歐姆定律的解說及應用。歐姆定律闡述電路之電壓、電流與電阻三者的關係，及相互間之影響。進一步運用歐姆定律簡化複雜電路成為等效電路，以解釋或說明電壓與電流之放大電路。

放大電路是電子電路之基本電路，對於放大電路之瞭解與計算，及單位之換算等，是本章學習之重點。

本章節次

- 1-1 電壓源 $V-I$ 特性及其內阻
- 1-2 電流源 $V-I$ 特性及其內阻
- 1-3 電阻 $V-I$ 特性，電容頻率特性
- 1-4 電壓放大器等效電路、電流放大器等效電路
- 1-5 戴維寧定理與諾頓定理

學習目標

1. 認識電壓源與電流源之差異及電路符號。
2. 應用電源之電壓與電流之特性，瞭解電源電路之特性。
3. 認識電容在交流電路形成之電容抗及其符號和數學式。
4. 瞭解電容抗與頻率之關係及對電路之作用。
5. 認識等效電路之型態及其作用。
6. 瞭解放大器等效電路放大倍數之計算及單位之轉換。
7. 可以簡化複雜電路為等效電路，並作電路間之互換。



1-1 電壓源 V - I 特性及其內阻

1-1.1 電壓源

電路動作所需之供電設備，稱為電源。電源有電壓源與電流源。電壓源有固定與可變電壓兩種，如圖 1-1 所示為直流電壓源之電路符號。固定電壓源如汽車用 12V 電池，手機用鋰電池 1.2V 等。可變電壓源常用的是電源供應器，一般可調之電壓範圍，由 0V 至 30V。直流電壓源之代號為 E ，單位為 V（伏特）。



圖 1-1 電壓源之種類

1-1.2 電壓源之內電阻

電壓源皆有內電阻，這是導電材料具有的屬性，稱實際電壓源。若不考慮內電阻對電壓源之損耗，通常設定內電阻值為 $0\ \Omega$ ，稱理想電壓源，如圖 1-2 所示為電壓源之等效電路。在分析電路時，常採用近似解法，求得相近的結果，通常都會忽略內電阻的影響，以理想電壓源作為電路之供電設備。

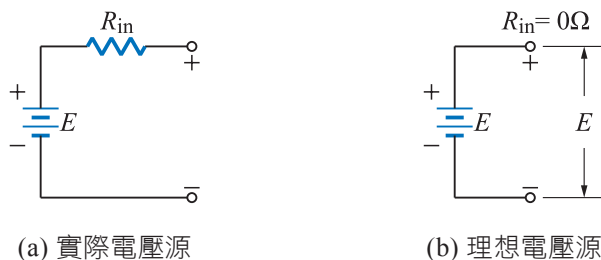


圖 1-2 電壓源之等效電路

1 理想電壓源

理想電壓源之電路，如圖 1-3(a) 所示。設電壓源 $E = 12\text{V}$ ，負載電阻 $R_L = 120\ \Omega$ ，電路電流為 I ，則電路電流值為：

$$I = \frac{E}{R_L} = \frac{12\text{V}}{120\Omega} = 0.1\text{A}$$

1-1 公式

$$\text{負載電壓： } V_L = IR_L = 0.1\text{A} \times 120\Omega = 12\text{V} = E$$

1-2 公式

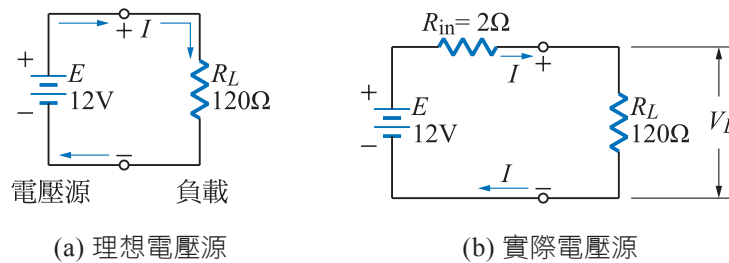


圖 1-3 電壓源電路

電路上之電壓源，若不考慮內電阻的影響，則負載電阻之壓降 V_L 等於供應電壓 E 。

2 實際電壓源

實際電壓源之電路，如圖 1-3(b) 所示，設電壓源之內電阻 $R_{in} = 2\ \Omega$ ，則電路電流為：

$$I = \frac{E}{R_{in} + R_L} = \frac{12\text{V}}{2\Omega + 120\Omega} = \frac{12\text{V}}{122\Omega} = 0.098\text{A}$$

1-3 公式

$$\text{負載電壓： } V_L = IR_L = 0.098\text{A} \times 120\Omega = 11.76\text{V} < E$$

1-4 公式



供壓電路之電壓源，若考慮內電阻，電路電流會較不考慮內電阻來得小，負載電阻之電壓降，也小於電源電壓， $V_L < E$ ，這表示供應電路之能量，部分會被內電阻消耗。

1-1.3 $V-I$ 特性曲線

如圖 1-3(b) 所示電路，若調小負載電阻 R_L ，提高電路電流 I ，則內電阻之消耗，對電壓與電流之關係，說明如下：

1. 調大電流 $I = 0.2 \text{ A}$ ，負載電壓 $V_L = E - IR_{in} = 12\text{V} - 0.2\text{A} \times 2\Omega = 11.6\text{V}$ 。
2. 調大電流 $I = 0.6 \text{ A}$ ，負載電壓 $V_L = E - IR_{in} = 12\text{V} - 0.6\text{A} \times 2\Omega = 10.8\text{V}$ 。
3. 調大電流 $I = 1 \text{ A}$ ，負載電壓 $V_L = E - IR_{in} = 12\text{V} - 1\text{A} \times 2\Omega = 10\text{V}$ 。

根據以上所述，繪出包含內電阻之電壓源，電路電流與負載電壓（或輸出電壓）之特性曲線，如圖 1-4 所示。因內電阻消耗能量，電流增加時，負載電阻之壓降（或輸出電壓）會下降，兩者成反比。

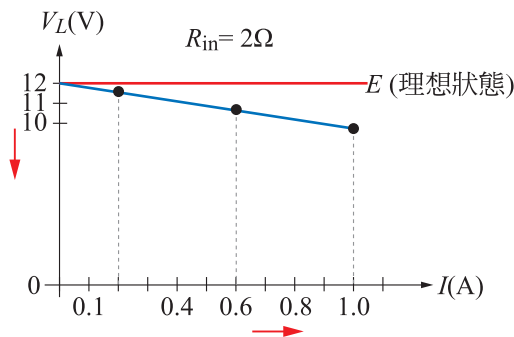


圖 1-4 含內電阻之 $V-I$ 特性曲線

1-1.4 電壓調整率

以圖 1-4 為例，若電流增大為 6A ，則 $V_L = E - IR_{in} = 12\text{V} - 6\text{A} \times 2\Omega = 0\text{V}$ ，輸出電壓等於 0V ，相當於汽車之電瓶沒有供應電壓給電路，結果車燈不亮、喇叭不響、電腦不動作等。因此，對任何供應之電壓源，理想的狀態下，負載電壓或輸出電壓應維持在可供負載動作的固定值。

例如電瓶供應 12V，不論電路電流 I 如何變動，負載電壓仍可保持在 12V，如圖 1-4 所示，供應電壓應維持在 E 值。

維持輸出電壓在理想狀況，可調整電壓之特性，以預估輸出電壓的狀態，稱電壓調整率 (voltage regulation, VR)。電壓調整率 ($VR\%$) 的定義：

$$VR\% = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\%$$

1-5 公式

式中， V_{NL} (null load, NL) 是沒有接上負載之電壓值，即理想電壓值，如圖 1-4 所示之 E 值； V_{FL} (full load, FL) 是接上全部負載的電壓值。理想狀況下， $V_{FL} = V_{NL} = E$ ，電壓調整率 $VR\% = 0$ ，此表示電壓調整率愈小愈好，愈接近理想狀態。理想狀態下，電壓源之內電阻 $R_{in} = 0 \Omega$ ，電壓調整率亦可以內電阻作為判斷的依據，關係式為：

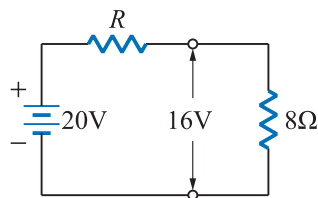
$$VR\% = \frac{R_{in}}{R_L} \times 100\%$$

1-6 公式

式中，負載電阻 R_L 保持定值，內電阻 R_{in} 值愈小，電壓調整率愈小，愈接近理想狀態。

例題 1-1

如下圖所示電路，試求電壓調整率 $VR\%$ 為多少？



■ 解
$$VR\% = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% = \frac{20V - 16V}{16V} \times 100\% = \frac{4V}{16V} \times 100\% = 25\%$$

$V_{NL} = E = 20V$ ， $V_{FL} = V_L = 16V$ 。

**例題 1-2**

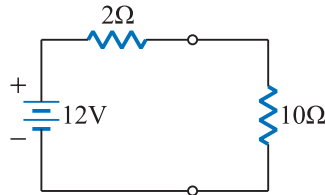
已知電壓調整率 $VR = 2\%$ ，供應電壓 $E = 100V$ ，試求負載電壓為多少伏特？

解 $VR\% = \frac{100V - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% = 2\%$ ， $100V - V_{FL} = 0.02V_{FL}$ ， $100V = 1.02V_{FL}$

$$V_{FL} = \frac{100V}{1.02} \cong 98V。$$

類題演練 1-1

1. 如下圖所示電路，試求電路之電壓調整率為多少 % ？

**1-1 隨堂練習**

- () 1. 若供應電壓為 12 V，在理想狀態下，輸出電壓應為 (A)12 V (B)11.8 V (C)11.6 V (D)10 V。
- () 2. 供應電壓 $E = 12 V$ ，已知負載電壓 $V_L = 8 V$ ，試求內電阻之電壓降為多少 V？ (A)1 (B)2 (C)3 (D)4。
- () 3. 電路電流若為 2A，內電阻為 2 Ω，負載電阻為 8 Ω，則供應電壓為 (A)16V (B)20V (C)12V (D)24V。
- () 4. 有一電路，電壓源為 24V，負載電壓為 24V，試求電壓調整率為 (A)1% (B)2% (C)0% (D)0.1%。
- () 5. 電路之電壓源為 55V，內電阻為 5 Ω，負載電阻為 50 Ω，試求電壓調整率為 (A)1% (B)5% (C)10% (D)15%。
- () 6. 電路電壓源為 120V，設計電壓調整率為 0%，負載電壓應為 (A)115V (B)110V (C)124V (D)120V。

1-2 電流源 $V-I$ 特性及其內阻

在電路上，供應電路能量的是電流，稱此供電設備為電流源。電流源供應電路固定的電流值及可變的電壓值，如圖 1-5(a) 所示。電流源之電路符號，以箭頭或 I 表示，單位為安培 (A)。

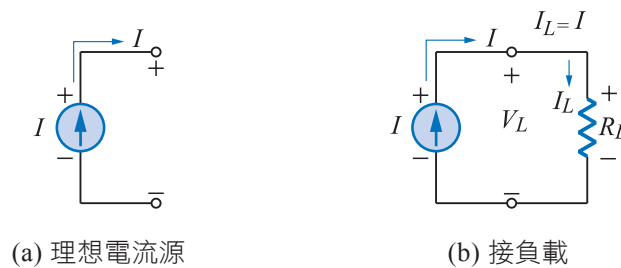


圖 1-5 理想電流源

電流流動之方向，決定元件之極性。電流流動之原則，以高電位（正）流向低電位（負），電流源是電路能量之供應者，所以自電流源端流出者是高電位為 " 正 "，經電路後再回至電流源之負端，形成電路動作之迴路。被動元件接受能量，所以流入元件者為正電位，流出端為負電位，如圖 1-5(b) 所示。

如圖 1-5(b) 所示，當電流源接上負載電阻 R_L ，負載電壓 V_L 或輸出電壓 V_o 等於 IR_L 伏特。設電流源為 5A，負載電阻為 $10\ \Omega$ ，則負載電壓為 $V_L = 5A \times 10\Omega = 50\ V$ 。

1-2.1 電流源之內電阻

電流源如同電壓源也有內電阻 R_{in} 。電流源之內電阻以並聯方式連接，如圖 1-6(a) 所示。電流有分流的效應，自電流源流出為 I ，經節點 (node) 分成兩部分，一流入內電阻為 I_{in} ，一流入負載為 I_L ，三者的關係為：

$$I = I_{in} + I_L$$

1-7 公式

式中，流入節點之電流等於流出節點之電流和。



依分流定則，電流源之內電阻愈大，流經內電阻的電流會變小，大部分之供應電流會流入負載，負載電流幾乎等於供應電流， $I_L \cong I$ 。當內電阻為無限大時，電流源之電流值與供應負載相同， $I_L = I$ ，此稱理想電流源。所以理想電流源之內電阻為無限大。

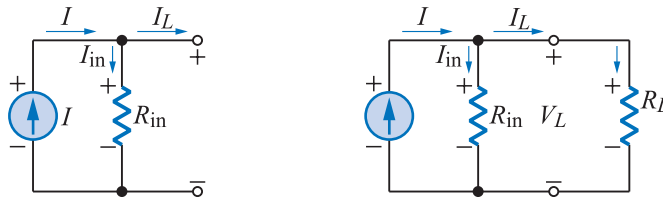


圖 1-6 電流源之內電阻

因有分流的效應，負載電壓相對地會降低。負載電壓為：

$$V_L = I_L R_L = (I - I_{in}) R_L$$

1-8 公式

如圖 1-6 所示電路，設負載電阻 $R_L = 10 \Omega$ ， $I_{in} = 1 \text{ A}$ ， $I = 5 \text{ A}$ ，則負載電壓為：

$$V_L = (I - I_{in}) R_L = (5 \text{ A} - 1 \text{ A}) \times 10 \Omega = 40 \text{ V}$$

考慮電流源之內電阻，因分流之效應，流入負載的電流會減少，產生的電壓降也會減小。

1-2.2 V-I 特性

1 理想電流源

理想電流源供應定值電流給電路，負載電阻若為固定值，負載電壓也為固定值。設負載電阻為可變值，可調範圍由 10Ω 調至 100Ω ，供應電流為 1 A ，則電流與電壓之關係為：

1. $R_L = 10 \Omega$ ，負載電壓（或輸出電壓） $V_L = IR_L = 1 \text{ A} \times 10 \Omega = 10 \text{ V}$ 。
2. $R_L = 50 \Omega$ ，負載電壓（或輸出電壓） $V_L = IR_L = 1 \text{ A} \times 50 \Omega = 50 \text{ V}$ 。
3. $R_L = 100 \Omega$ ，負載電壓（或輸出電壓） $V_L = IR_L = 1 \text{ A} \times 100 \Omega = 100 \text{ V}$ 。

將電壓與電流之關係，以曲線表示，如圖 1-7 所示。

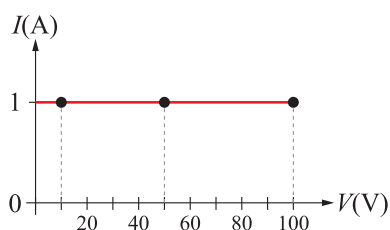


圖 1-7 理想電流源之 V - I 特性曲線

由曲線可知，理想電流源之 V - I 曲線為一水平線，電流源供應一固定電流值，負載電壓因電阻值的變動而改變。當電流值保持定值時，電阻值與電壓值成正比。

2 實際電流源

實際電流源雖受內電阻分流影響，流入負載之電流仍是固定值。設負載電阻為可變值，可調範圍由 $10\ \Omega$ 調至 $100\ \Omega$ ，供應電流為 1 A ，流入內電阻之電流 $I_{\text{in}} = 0.2\text{ A}$ ，負載電流 $I_L = I - I_{\text{in}} = 0.8\text{ A}$ ，則電流與電壓之關係為：

1. $V_L = 10\ \Omega$ ，負載電壓（或輸出電壓） $V_L = I_L R_L = 0.8\text{ A} \times 10\ \Omega = 8\text{ V}$ 。
2. $V_L = 50\ \Omega$ ，負載電壓（或輸出電壓） $V_L = I_L R_L = 0.8\text{ A} \times 50\ \Omega = 40\text{ V}$ 。
3. $V_L = 100\ \Omega$ ，負載電壓（或輸出電壓） $V_L = I_L R_L = 0.8\text{ A} \times 100\ \Omega = 80\text{ V}$ 。

將電壓與電流之關係，以曲線表示，如圖 1-8 所示。

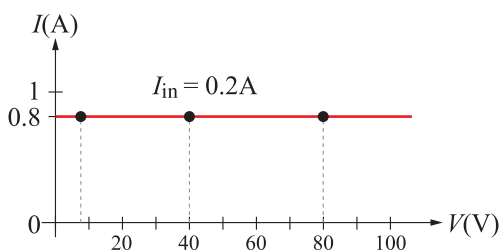


圖 1-8 實際電流源之 V - I 特性曲線

電流源供應定值電流給電路，受內電阻分流影響，供應電流值會減小，減小之幅度端視內電阻影響之大小而定。特性曲線還是水平線，電流值保持固定值時，負載電壓與電阻成正比關係。



例題 1-3

理想電流源供應電路之電流 I 若為 3A ，試求流入負載之電流 I_L 為多少 A ？
設負載電阻為 $10\ \Omega$ ，則負載電壓 V_L 為多少 V ？

- 解
- (1) $I_L = I = 3\ \text{A}$
 - (2) $V_L = I_L R_L = 3\text{A} \times 10\ \Omega = 30\ \text{V}$ 。

例題 1-4

實際電流源供應 5A 電流，設流入內電阻之電流為 1A ，負載電阻為 $50\ \Omega$ ，試求負載電壓為多少 V ？

- 解
- 流入負載電流： $I_L = I - I_{in} = 5\text{A} - 1\text{A} = 4\text{A}$
負載電壓： $V_L = I_L R_L = 4\text{A} \times 50\ \Omega = 200\ \text{V}$ 。

類題演練 1-2

1. 已知內電阻電流為 0.5A ，負載電流為 4.5A ，試求電流源供應電路之電流為多少 A ？
2. 電流源供應 3A ，流入負載電流為 2.8A ，負載電阻為 $10\ \Omega$ ，試求負載電壓為多少 V ？

1-2 隨堂練習

- () 1. 電路電流保持定值，則電壓與電阻成
(A) 反比 (B) 倒數
(C) 正比 (D) 以上皆非。
- () 2. 10A 電流源，流入負載電流為 9.5A，則內電阻電流為
(A) 0.5A (B) 10A
(C) 19.5A (D) 1A。
- () 3. 已知負載電流等於電流源供應電流為 2A，若負載電阻為 2.5 Ω ，則負載電壓為
(A) 1.25V (B) 2.5V
(C) 4.5V (D) 5V。
- () 4. 理想電流源之內電阻應為
(A) 短路 (B) 開路
(C) 串接 (D) 並接。
- () 5. 有關電流源，下列敘述，何者為錯？
(A) 電流值為定值
(B) 理想狀態，負載電流等於供應電流
(C) 內電阻電流等於負載電流減去供應電流
(D) 負載電壓等於負載電流乘上負載電阻。
- () 6. 理想或實際電流源之電壓 V 、電流 I 特性曲線為
(A) 垂直線 (B) 水平線
(C) 斜線 (D) 對角線。



1-3 電阻 $V-I$ 特性，電容頻率特性

1-3.1 電阻

電流 (I) 流經電路上任何物質，都會碰上如同推擠的阻力。阻力的來源，起自於電流引起物質內電荷移動時，相互間的碰撞，或材料內電子間相互的摩擦，如同吹風機、電燈泡之電源線等，接上電源一段時間後就會發熱，這種對流經的電流產生阻力引發熱量之物體，稱為電阻。簡稱電阻為對電流的阻力。電阻 (resistance) 以 "R" 作為代號，計算單位為希臘字母 " Ω " (讀音 "omega")。

1-3.2 電阻的計算

電路中若可求出電阻值的大小，則流經電路的電流，及供應電路的電壓都可以依關係式求得。電路上，基本的關係式，是指電壓 (V)、電流 (I) 及電阻 (R) 三者間的關係。

電壓 (voltage) 是電路供應壓電壓、電動勢、電位差及電壓降的統稱，若沒有特別指定，一般皆以 "電壓" 稱呼。電壓之代號為 E 或 V ，單位為伏特 (V)。

電流 (current) 的代號為 I ，單位為安培 (ampere, A)。

已知電阻是電流的阻力，兩者成反比關係，電阻愈大，電流愈小。決定電阻與電流的關係，電壓必須保持為固定值，則三者的關係為：

$$E = IR$$

1-9 公式

用實際的數字，說明三者的關係：

1. 當 $E = 10\text{V}$ ， $I = 2\text{A}$ ，電阻 $R = \frac{E}{I} = \frac{10\text{V}}{2\text{A}} = 5\Omega$ 。
2. 當 $E = 10\text{V}$ ， $I = 5\text{A}$ ，電阻 $R = \frac{E}{I} = \frac{10\text{V}}{5\text{A}} = 2\Omega$ 。
3. 當 $E = 10\text{V}$ ， $I = 10\text{A}$ ，電阻 $R = \frac{E}{I} = \frac{10\text{V}}{10\text{A}} = 1\Omega$ 。

可知，電壓保持定值 $E = 10\text{V}$ ，電流 $I = 2, 5, 10\text{A}$ 漸增，電阻 $R = 5, 2, 1\Omega$ 漸減，兩者成反比，符合關係式： $E = IR$ ，稱此關係式為歐姆定律 (Ohm's law)。

例題 1-5

已知電燈泡的耐壓為 100V ，電流為 5A ，試求電燈泡的電阻值為多少 Ω ？

■解 $R = \frac{E}{I} = \frac{100\text{V}}{5\text{A}} = 20\Omega$ 。

例題 1-6

電路供應電壓若為 12V ，設計電路電流為 3A ，則電阻應為多少 Ω ？

■解 $R = \frac{E}{I} = \frac{12\text{V}}{3\text{A}} = 4\Omega$ 。

類題演練 1-3

1. 電瓶電壓由 12V 升至 24V ，電流由 2A 升至 4A ，試求電阻變動之範圍？
2. 電阻保持在 25Ω ，電流為 4A ，試求電壓為多少 V ？



1-3.3 電阻 V - I 特性

按歐姆定律，當電阻保持定值時，電壓與電流成正比；電壓升高，電流增大。關係式為：

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

1-10 公式

若電阻保持定值 $R = 10\Omega$ ，電壓 V 與電流 I 的關係，可描繪成特性曲線如圖 1-9 所示，說明如下：

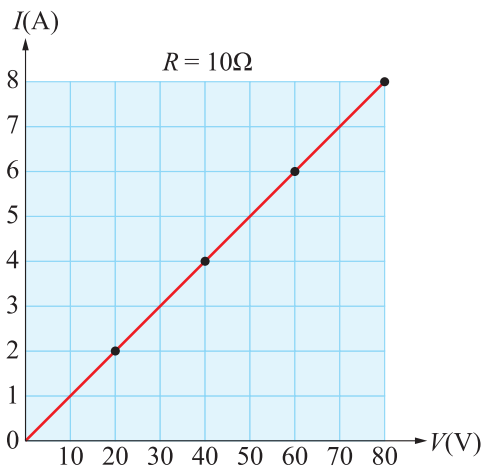


圖 1-9 R 為定值， V - I 之特性曲線

求得電流的關係式為： $I = E / R$ 。設定各個電壓值 V ，電流值可依序求出，結果如表 1-1 所示。

表 1-1 電阻為定值，電壓與電流之關係表格

	電阻 $R = 10\Omega$					備註
電壓 V	0	20	40	60	80	電壓單位 "V"
電流 I	0	2	4	6	8	電流單位 "A"

當電阻保持為 10Ω 時，電壓若由 $20V$ 增至 $80V$ ，則電流由 $2A$ 增至 $8A$ ，兩者變動之比率為：

$$\frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{8-2}{80-20} = \frac{6}{60} = 0.1 = 10\%$$

1-11 公式

調大固定電阻值為： $R = 15\Omega$ ， V - I 特性曲線之變動，如圖 1-10 所示。

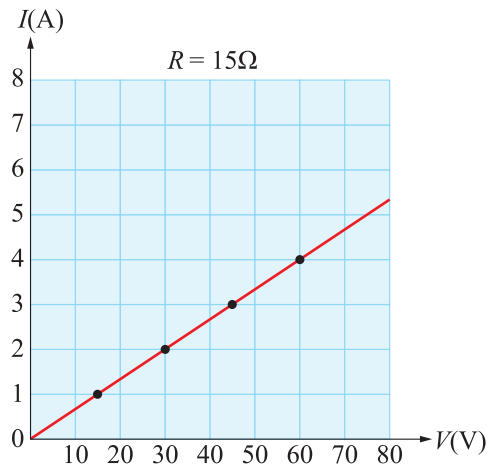


圖 1-10 $R = 15\Omega$ 之 V - I 之特性曲線

依關係式： $I = E / R$ ，求得座標點： $(30, 2)$ 、 $(45, 3)$ 、 $(60, 4)$ ，描出座標點，連線各座標點，顯示 V - I 關係之曲線，相較 $R = 10\Omega$ 之曲線，定值電阻較大時，特性曲線變得較平坦。如果電壓值由 $30V$ 增至 $60V$ ，電流值則由 $2A$ 增至 $4A$ ，兩者變動的比率為：

$$\frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{4-2}{60-30} = \frac{2}{30} = 0.067 = 6.7\%$$

調小定值電阻： $R = 5\Omega$ ， V - I 曲線之變動，如圖 1-11 所示。

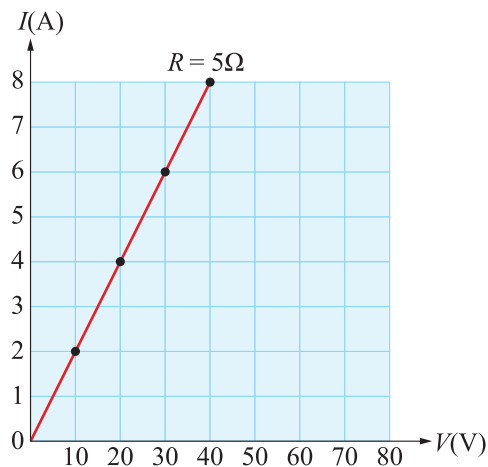


圖 1-11 $R = 5\Omega$ 之 V - I 之特性曲線



依關係式： $I = E / R$ ，求得座標點： $(10, 2)$ 、 $(20, 4)$ 、 $(40, 8)$ ，描出座標點，連線各座標點，顯示 $V-I$ 關係之曲線，相較 $R = 10\Omega$ 之曲線，定值電阻變小時，特性曲線變得較陡峭。如果電壓值由 $10V$ 增至 $40V$ ，電流值則由 $2A$ 增至 $8A$ ，兩者變動的比率為：

$$\frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{8-2}{40-10} = \frac{6}{30} = 0.2 = 20\%$$

$V-I$ 特性曲線以電壓 (V) 為橫軸，電流 (I) 為縱軸。將電壓與電流之座標值： $(0, 0)$ 、 $(20, 2)$ 、 $(40, 4)$ 、 $(60, 6)$ 及 $(80, 8)$ ，描在座標圖上，再將各座標點連結起來，如圖 1-9 所示為電阻保持在 10Ω 時，電壓 V 與電流 I 的關係曲線。可知，電壓值增加，電流值也增加，兩者成正比。

比較三種固定電阻值的 $V-I$ 特性：電阻為 $15\Omega > 10\Omega > 5\Omega$ ，電流對電壓之變動率 $6.7\% < 10\% < 20\%$ 。由此可知，調大固定電阻值，在相同電壓之變動範圍內，電流的變動範圍較小， $V-I$ 特性曲線較陡峭；調小固定電阻值，電壓變動範圍相同，電流的變動範圍較大， $V-I$ 特性曲線較平坦。由此證實電阻與電流成反比，電阻大時，電流變動較小；電阻小時，電流變動較大。

例題 1-7

設電源調節器之電阻為 20Ω ，若調整電壓變動的範圍由 $10V$ 至 $15V$ ，試求電流的變動範圍為何？

■ 解 當電壓 $V_{10} = 10V$ 時，電流 $I_{10} = \frac{V_{10}}{R} = \frac{10V}{20\Omega} = 0.5A$

當電壓 $V_{15} = 15V$ 時，電流 $I_{15} = \frac{V_{15}}{R} = \frac{15V}{20\Omega} = 0.75A$

電流變動的範圍由 $0.5A$ 至 $0.75A$ 。

可知：電阻為定值，電流隨電壓的增加而變大，兩者成正比。

例題 1-8

車用電池為 12V，若選用元件之電流值為 5A，則元件之電阻值應為多少 Ω ？

解
$$R = \frac{E}{I} = \frac{12\text{V}}{5\text{A}} = 2.4\Omega。$$

類題演練 1-3

3. 電壓為 12V，希望電阻為 5 Ω ，則電流最小應為多少安培？
4. 已知電路電壓為 100V，電流 10A，試求電阻為多少歐姆？

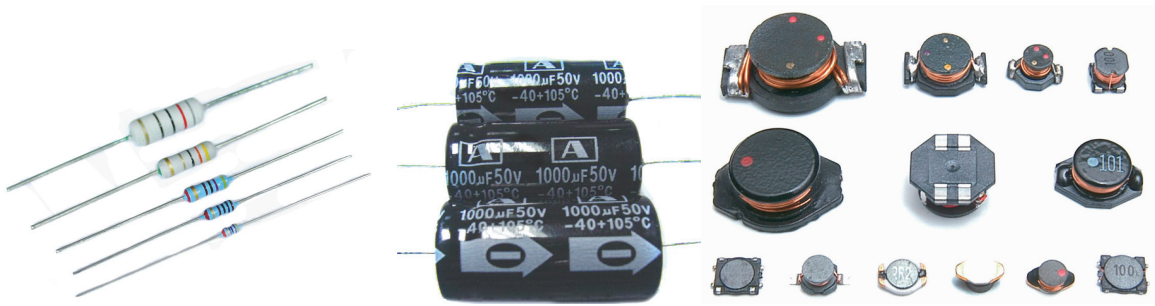
1-3.4 電 容

1 構 造

電容器無論在用途上、操作上、或構造上都和電阻器不同。

1. 在元件之特性上：電阻器只和所在電路之電壓或電流的變化量有關；電容器將能量用某種形式儲存起來，直到電路需要時，會釋放出來供電路使用。
2. 在構造上：以碳素電阻為例，以石墨、碳等加上其他膠類共同封入長圓形的小外殼內，外殼兩端加入引線，再經加壓、加熱形成。電容器則將兩片材質、體積大小、形狀相同之電極板，平行置放在空間，兩板間以空氣隔離。電極板的材質，常用的有鋁片或鋁箔，兩極板間之絕緣體，若以氧化鋁作為介質，稱為電解電容器。

一般電容器的介質是空氣、雲母、紙、油。電容器接上電壓源時，電極板會儲存電荷，二電極板上儲存的電荷大小相等，兩極板的極性相反，一正一負，所以，電容器之淨電荷為零，保持電中性。電阻與電容之形體，如圖 1-12 所示。



(a) 碳素電阻

(b) 電解電容器及 SMD (平面) 型

圖 1-12 碳素電阻及電解電容器

在電路中，電極板能儲存電荷的能力，稱為電容 (capacitance)。兩平行電極板間以絕緣物質，如空氣、油質、或紙質等隔開，同時具有儲存電荷的能力，稱為電容器 (capacitor 或 condenser)。導電極板稱為電容器之電極 (electrode)，絕緣物質稱為電介質 (dielectric) 或簡稱介質。在應用上，主要是作為阻絕直流、耦合交流、濾波、調諧、相移、儲存能量、旁路、耦合電路、喇叭系統等，也被應用於相機中的閃光燈，作為儲電或放電等用途。

2 電容量

電容器上兩極板具有儲存電荷 (Q) 的能力。電容量 (capacitance) 可定義為：在電容器兩極板上若跨接 1 伏特的電壓 (V)，則在極板上會儲存 1 庫侖 (Q) 的電荷，稱此電容器儲存的電容量為 1 法拉 (Farad)，關係式為：

$$C = \frac{Q}{V}$$

1-12 公式

式中， C 為電容量的代號，單位法拉 (F)。在計算電路之電容量值，常使用的單位是毫法拉或微法拉。法拉與毫法拉 (mF) 及微法拉 (μF) 的關係為： $1\text{mF} = 10^{-3}\text{F}$ ， $1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$ 。 Q 為電荷的代號，單位為庫侖 (C)。

例題 1-9

有一電容器接上 12V 電壓源時，兩電極板儲存之電荷量為 0.012 庫侖 (C)，試求電容器之電容量為多少微法拉 (μF)？

解 $C = \frac{Q}{V} = \frac{0.012}{12} = 0.001\text{F} = 1\text{mF} = 1000\mu\text{F}。$

註 計算時，應用基本單位，電容器為法拉 (F)。1 F = 10^3 mF = 10^6 μF 。

例題 1-10

10 μF 電容器接上電壓時，測得電極板之電荷為 0.005 庫侖 (C)，試求電壓源為多少伏特？

解 $V = \frac{Q}{C} = \frac{0.005}{10 \times 10^{-6}} = 0.0005 \times 10^6 = 500\text{V}。$

例題 1-11

10 μF 電容器接上 10V 電壓源，試求電容器可儲存之電荷量為多少庫侖？

解 $Q = CV = 10 \times 10^{-6} \times 10 = 0.0001\text{C}。$

類題演練 1-3

- 將電容器接上 15V 電壓，已知電容量為 20 μF ，試求極板上蓄積之電荷量為多少庫侖？
- 將 20V 電壓接上電容器，極板蓄積 0.0024 庫侖電荷量，試求電容量為多少 μF ？



3 電容抗

頻率定義為 1 秒內的週波數。即在 1 秒鐘內，相同正弦波重複出現的次數。如台電使用的電源頻率為 60 赫芝 (Hz)，記為 $f = 60$ Hz，表示在 1 秒鐘內，相同之正弦波重複出現 60 次。直流電是個固定值，沒有頻率，即直流電的頻率 $f = 0$ Hz。所以，應用頻率的元件，都使用在交流電。電容器應用在交流電，其作用如同在直流電的電阻具有阻抗，稱為電容抗，代號為 X_C ，單位為歐姆 (Ω)，關係式為：

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

1-13 公式

式中， ω 為角速度，單位為徑 (rad) / 秒， $1\omega = 2\pi f$ ，和頻率成正比。 f 為電源頻率，單位為赫芝。

電容抗與角速度、頻率或電容值成反比。

例題 1-12

頻率為 50Hz 作用在 $0.1\mu\text{F}$ 的電容器上，試求電容抗為多少歐姆？

■解
$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 0.1 \times 10^{-6}} = \frac{10^6}{31.4} = 31847\Omega \cong 31.85\text{k}\Omega。$$

例題 1-13

電容抗為 50Ω ，電源頻率為 50Hz，試求電容量為多少 μF ？

■解
$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 50} = \frac{1}{15700} = 0.000064\text{F} \cong 64\mu\text{F}。$$

類題演練 1-3

7. 電容量為 $33\mu\text{F}$ 之電容器，在電源頻率為 50Hz 之電路，其電容抗為多少 Ω ？

4 頻率特性

電容器若使用在直流電路，因直流的頻率 $f = 0 \text{ Hz}$ ，則電容抗為：

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 0 \times C} = \frac{1}{0} = \infty$$

1-14 公式

式中， $X_c = \infty$ 歐姆，表示電容器使用在直流電路時呈現開路的狀態。所以，電容器使用在直流電路，有隔絕電路電流的效用。電容抗與供應頻率成反比，兩者的關係，說明如下：

假設電源頻率為可變值，電路上之電容值固定為 $C = 10 \mu\text{F}$ ，則電容器在下列頻率時之電容抗為：

1. 當 $f = 50 \text{ Hz}$ 時：電容抗 $X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50 \times 10 \times 10^{-6}} = 318.5 \Omega$
2. 當 $f = 100 \text{ Hz}$ 時：電容抗 $X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 100 \times 10 \times 10^{-6}} = 159.2 \Omega$
3. 當 $f = 1 \text{ kHz}$ 時：電容抗 $X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 1000 \times 10 \times 10^{-6}} = 15.9 \Omega$
4. 當 $f = 10 \text{ kHz}$ 時：電容抗 $X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 10000 \times 10 \times 10^{-6}} = 1.59 \Omega$

將頻率的變化量與對應的電容抗，標示在座標圖上，同時連接各座標點，可繪出特性曲線，如圖 1-13 所示。

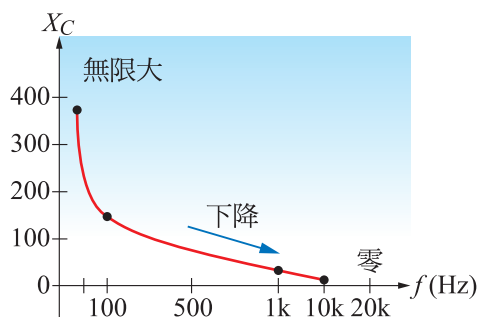


圖 1-13 電容抗隨頻率變動之特性曲線



如圖之特性曲線所示，應用在交流的電容器如同可變電阻器，其大小隨頻率的變動而改變。

1. 當頻率接近於零時：電容抗為無限大，應用於直流電路，如同斷路的開關。
2. 低頻時：電容抗非常大。
3. 高頻時：電容抗非常小。

電容之電容抗如同電阻之作用，不同的是，電容抗還具有頻率的特性。應用在交流電路，有改變波形的功用；充、放電之特性，可作為延時控制器；頻率之特性，可作為調諧器及濾波器。



1-3 隨堂練習

- () 1. 電阻保持定值，電壓與電流成
(A) 正比 (B) 反比 (C) 先正比後反比 (D) 先反比後正比。
- () 2. 電阻為 5Ω ，電流為 $1A$ ，電壓等於
(A) $6V$ (B) $4V$ (C) $5V$ (D) $0.2V$ 。
- () 3. 電壓為 $10V$ ，希望產生 $2A$ 電流，問電阻應設計為
(A) 20Ω (B) 5Ω (C) 12Ω (D) 8Ω 。
- () 4. 電阻由 2Ω 變動到 10Ω ，電流固定為 $2A$ ，電壓變動之範圍為
(A) $0V$ 至 $8V$ (B) $1V$ 至 $5V$ (C) $4V$ 至 $12V$ (D) $4V$ 至 $20V$ 。
- () 5. 頻率與電容器之電容抗成
(A) 正比 (B) 反比 (C) 零 (D) 無限大。
- () 6. 電容抗之作用如同電阻，其單位為
(A) 歐姆 (B) 安培 (C) 伏特 (D) 瓦特。
- () 7. 電容抗為 33Ω ，電源頻率為 $60Hz$ ，試求電容量為多少 μF ?
(A) 64 (B) 72 (C) 80 (D) 100 。
- () 8. 電容量為 $33\mu F$ 之電容器，在電源頻率為 $60Hz$ 之電路，其電容抗為多少 Ω ? (A) 80 (B) 100 (C) 60 (D) 120 。

1-4 電壓放大器等效電路、電流放大器等效電路

1-4.1 等效電路

將複雜電路以簡單電路替代，稱簡單電路為複雜電路的等效電路。重點是複雜電路求解之結果，與簡單電路相同。典型的代表電路，有戴維寧等效電路與諾頓等效電路兩種。兩者的差別，戴維寧等效電路是電壓源；諾頓等效電路是電流源。舉個例子說明：有一電路如圖 1-14 所示，題目要求流經 6Ω 電阻之電流 I 。試以戴維寧與諾頓等效電路表示。

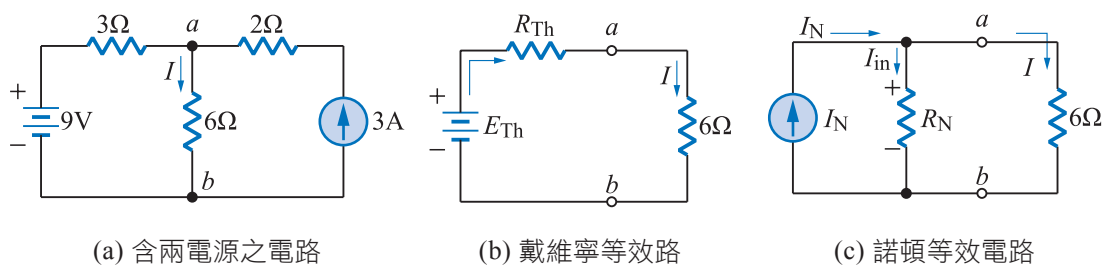


圖 1-14 等效電路

圖 1-14(a) 所示電路具有兩個電源，一為電壓源 $9V$ ，一為電流源 $3A$ ，另有三個電阻， 2Ω 、 3Ω 及 6Ω 。題目要求流經 6Ω 電阻之電流 I 。經簡化成圖 1-14(b) 及 (c) 之等效電路圖。圖 (b) 為戴維寧等效電路，如同含內電阻之電壓源電路，再接負載電阻 6Ω ，則流經 6Ω 之電流為：

$$I = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + 6\Omega}$$

1-15 公式

式中， E_{Th} 為戴維寧等效電壓， R_{Th} 為戴維寧等效電阻。

圖 (c) 為諾頓等效電路如同含內電阻之電流源，設流經內電阻之電流為 I_{in} ，則流經 6Ω 之電流為：

$$I = I_N - I_{in}$$

若可忽略 I_{in} ，則流經 6Ω 之電流為電流源電流，即 $I = I_N$ ， I_N 為諾頓等效電流， R_N 為諾頓等效電阻。



戴維寧等效電壓及電阻，與諾頓等效電流及電阻，都有一定之求解過程，必須參考相關教學知識，再加多次的演練，才能得心應手，善用等效電路解法之便利性。

1-4.2 放大器

放大是電子電路之基本理念之一，將放大之理念放進電子電路，其組成的電路，稱為放大電路。放大電路大多應用為小信號的放大，例如 CD 播放機或 MP3 播放等，因自 CD 取得的音樂信號太小（電路上的小信號），無法直接由人耳收聽，必需將信號加以放大以推動揚聲器（或稱喇叭），人耳才能聽出悅耳的聲音，在這視聽電路中，擔任放大信號者，就是放大電路或稱放大器或擴大器。

在放大器的基本電路結構，包含有主動元件、被動元件及推動元件動作之電源供應器。被動元件有電阻器、電容器及電感器等。主動元件有真空管、電晶體及場效電晶體等。因電晶體在電子電路中使用最多，所以放大電路之主動元件，也以電晶體電路作為說明的主要架構。

基本上，放大器（amplifier）是指電路上輸入與輸出間之比例關係，此關係又稱為放大倍數或增益（gain）。例如功率放大器（power amplifier）是指電路上輸出率與輸入功率的比值；電壓放大器（voltage amplifier）是電路上輸出電壓與輸入電壓的比值；電流放大器（current amplifier）是指電路上輸出電流與輸入電流的比值。

在放大電路上，揚聲器所發出的音量與功率增益成正比，而人耳對音量之判別是對數特性的反應，所以應用對數法來測量音量之增益，其單位為貝爾（bell）。貝爾為輸出入功率比以 10 為底取對數的值。因貝爾作為單位其值過大，故以十分之一貝爾為單位，稱為分貝。關係式為：

$$\text{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_o}{P_i}$$

1-16 公式

式中， P_o 為放大器的輸出功率， P_i 為放大器的輸入功率。當分貝為正時，表示放大器產生功率增益；分貝為負時，表示放大器在耗損功率。電壓與電流放大器，以分貝表示為：

$$\text{dB} = 20 \log_{10} \frac{V_o}{V_i} \quad \text{dB} = 20 \log_{10} \frac{I_o}{I_i}$$

例題 1-14

設輸入電壓為 10V，輸出電壓為 100V，試求電壓放大倍數為多少？若以分貝表示，又為多少？

■ 解 設電壓放大倍數為 A_v ，則 $A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{100\text{V}}{10\text{V}} = 10$

$$\text{dB} = 20 \log_{10} \frac{V_o}{V_i} = 20 \log_{10} 10 = 20 \times 1 = 20\text{dB}$$

註 $\log_{10} 10 = 1$ ， $\log_{10} 1000 = \log_{10} 10^3 = 3$

例題 1-15

有一電壓放大器之電壓增益為 40dB，試求電壓之放大倍數為多少？

■ 解 $\text{dB} = 20 \log_{10} \frac{V_o}{V_i} = 40$ ， $\log_{10} \frac{V_o}{V_i} = \frac{40}{20} = 2$ ， $\frac{V_o}{V_i} = 10^2 = 100$

類題演練 1-4

1. 電流放大器之輸入電流為 0.1A，輸出電流為 10A，試求電流放大倍數及分貝為多少？
2. 功率放大器之輸入功率為 10W，輸出功率為 20W，試求功率放大倍數及分貝為多少？

註 $\log_{10} 3 = 0.4771$ ， $\log_{10} 7 = 0.8451$

$$\log_{10} 5 = \log_{10} \frac{10}{2} = \log_{10} 10 - \log_{10} 2 = 1 - 0.3010 = 0.6990$$

$$\log_{10} 6 = \log_{10} 3 \times 2 = \log_{10} 3 + \log_{10} 2 = 0.4771 + 0.3010 = 0.7781$$



1-4.3 電壓放大器等效電路

依放大器的作用，將輸入電壓按比例放大輸出，稱為電壓放大器，輸出電壓值與輸入電壓值之比例值，稱為電壓放大倍數或稱增益。在電子電路中，電晶體是基本的放大器元件，如圖 1-15 所示。

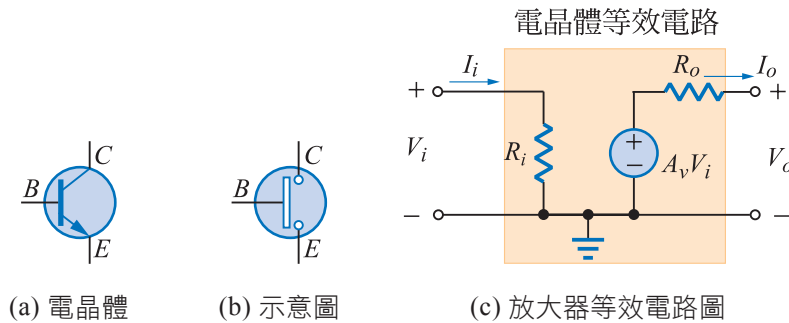


圖 1-15 電晶體符號及放大等效電路

圖 1-15(a) 所示為電晶體之符號。電晶體共有三隻接腳，分別為集極接腳代號為 C ；射極接腳代號為 E ；基極接腳代號為 B 。圖 1-15(b) 為電晶體動作之示意圖，控制基極有如按下開關之按鈕，導通集極與射極就有電流通路。圖 1-15(c) 為電壓放大器之等效電路圖。電壓放大器有兩迴路，一為輸入迴路，輸入端 B ，一為輸出迴路，輸出端為 C ，電晶體為兩迴路之連接開關。

如圖 1-15(c) 所示電路，依放大增益之定義，在電路上，其放大倍數與輸出入電壓之關係式為：

$$\text{輸出值與輸入之關係： } v_o = A_v v_i$$

1-17 公式

$$\text{輸出入之放大倍數或增益： } A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

例題 1-16

有一電壓放大器之輸出電壓為 50V，放大倍數為 10，試求輸入電壓為多少 V？

解 $A_v = \frac{V_o}{V_i}$ ， $V_i = \frac{V_o}{A_v} = \frac{50V}{10} = 5V$ 。

類題演練 1-4

3. 有一電壓放大器之放大倍數為 20，輸入電壓為 0.3V，試求輸出電壓為多少 V？

1-4.4 電流放大器等效電路

依放大器的作用，將輸入電流按比例放大輸出，稱為電流放大器，輸出電流值與輸入電流值之比例值，稱為電流放大倍數或稱增益。如圖 1-16(b) 所示為電流放大器之等效電路。電晶體為電流放大器之基本元件，其作用在小信號放大電路。

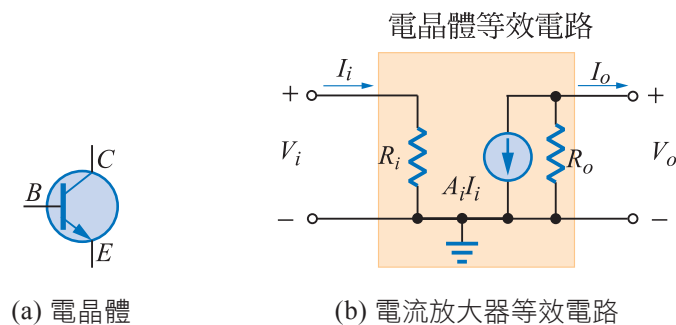


圖 1-16 電晶體符號及放大器等效電路

圖 1-16(a) 所示為電晶體符號。電晶體應用在交流電路，係作為信號放大器，放大器之組件經近似解法，簡化成輸入端為二極體之交流電阻，輸出端為電流源，其電流放倍數或增益之關係式為：

$$A_i = \frac{I_o}{I_i}$$

1-18 公式

式中， I_o 為輸出端電流，單位為安培； I_i 為輸入端電流，單位為安培。

**例題 1-17**

有一電流放大器之輸出電流為 2A，輸入電流為 0.01A，試求電流放大倍數為多少？

■ 解
$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{2A}{0.001A} = 2000 \text{ (倍)}。$$

類題演練 1-4

4. 電流放大器之放大倍數為 50，若輸入電流為 0.2A，則輸出電流為多少 A？

**1-4 隨堂練習**

- () 1. 戴維寧等效電路是電壓源
(A) 串接電阻 (B) 並接電阻 (C) 先串後並接電阻 (D) 先並後串接電阻。
- () 2. 諾頓等效電路是電流源
(A) 串接電阻 (B) 並接電阻 (C) 先串後並接電阻 (D) 先並後串接電阻。
- () 3. 設輸入電壓為 2V，輸出電壓為 20V，試求電壓放大倍數為多少分貝？
(A)2 (B)20 (C)1 (D)10。
- () 4. 有一電壓放大器之電壓增益為 20dB，試求電壓之放大倍數為多少？
(A)200 (B)100 (C)20 (D)10。
- () 5. 電流放大器之輸入電流為 0.5A，輸出電流為 1.5A，試求電流放大倍數及分貝各為多少？ (A)3，4.8 (B)5，4.8 (C)3，9.5 (D)5，9.5。
- () 6. 有一電壓放大器之輸出電壓為 120V，放大倍數為 10，試求輸入電壓為多少 V？ (A)12 (B)1.2 (C)10 (D)1。
- () 7. 電流放大器之放大倍數為 25，若輸入電流為 0.2A，則輸出電流為多少 A？ (A)2 (B)5 (C)10 (D)25。

1-5 戴維寧定理與諾頓定理

1-5.1 戴維寧等效電路

戴維寧定理之敘述：在直流網路中，任意兩端點（ a 、 b ）間，皆可以一電壓源（ E_{Th} ）與串聯電阻（ R_{Th} ）所組成之等效電路來替代，如圖 1-17 所示。

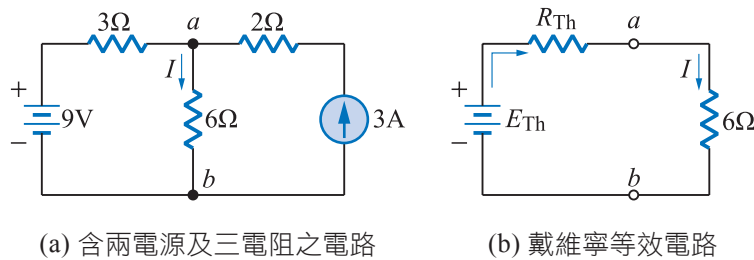


圖 1-17 戴維寧等效電路

圖 1-17(b) 所示等效電路為含內電阻之電壓源接待測電阻。 R_{Th} 稱為戴維寧等效電阻， E_{Th} 稱為戴維寧等效電壓，兩值之求法為：

1 等效電阻 R_{Th} 之求法

1. 令電路之所有電源為零：電壓源短路；電流源開路。
2. 再依電阻電路，如串聯、並聯或串並聯等計算方法，求得 a 、 b 間之等效電阻 $R_{ab} = R_{Th}$ 。

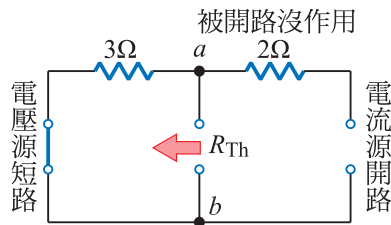


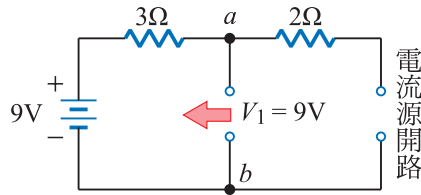
圖 1-18 等效電阻之求解

圖 1-18 之電路， 2Ω 電阻被開路， a 、 b 間對應之等效電阻為 3Ω ，所以， $R_{ab} = R_{Th} = 3\Omega$ 。



2 等效電壓 E_{Th} 之求法

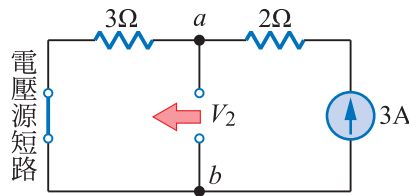
1. 先令電流源為零（開路），設 a 、 b 間電壓為 V_1 ，如圖 1-19 所示。



↑ 圖 1-19 電流源為零之電路

圖 1-19 之電路沒形成封閉迴路，故 a 、 b 間之電壓等於電壓源電壓， $V_1 = 9\text{ V}$ 。

2. 再令電壓源為零，短路，設 a 、 b 間電壓為 V_2 ，如圖 1-20 所示。

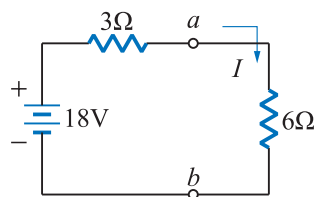


↑ 圖 1-20 電壓源為零之電路

圖 1-20 之電路，可知 V_2 為 3Ω 電阻之壓降，則 $V_2 = 3\text{ A} \times 3\Omega = 9\text{ V}$ 。

3. 等效電壓 $E_{Th} = V_1 + V_2 = 9\text{ V} + 9\text{ V} = 18\text{ V}$ 。相加是因 V_1 與 V_2 之極性相同，上正下負。

將等效電阻及電壓代入戴維寧等效電路，如圖 1-21 所示。



↑ 圖 1-21 戴維寧等效電路

流經 6Ω 之電流：
$$I = \frac{18\text{ V}}{3\Omega + 6\Omega} = 2\text{ A}。$$

例題 1-18

戴維寧等效電路， $E_{Th} = 12\text{ V}$ ， $R_{Th} = 3\Omega$ ，待測電阻 $R = 21\Omega$ ，試求流過待測電阻之電流為多少 A？

解
$$I = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + R} = \frac{12\text{V}}{3\Omega + 21\Omega} = 0.5\text{A}。$$

類題演練 1-5

1. 戴維寧等效電路， $E_{Th} = 16\text{ V}$ ， $R_{Th} = 2\Omega$ ，待測電阻 $R = 6\Omega$ ，試求待測電阻之電壓降為多少 V？

1-5.2 諾頓等效電路

諾頓定理敘述為：在直流網路中，任意兩端點（ a 、 b ）間，皆可以一電流源（ I_N ）與並聯電阻（ R_N ）所組成之等效電路來替代。如圖 1-22 所示， I_N 為諾頓等效電流， R_N 為諾頓等效電阻。

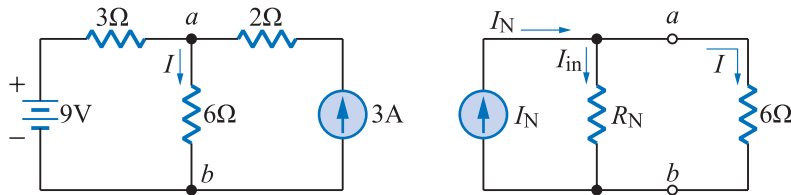


圖 1-22 諾頓等效電路

運用諾頓定理求解電路任兩端之電流，簡化過程中，在電壓方面為兩端開路之壓降，在電流方面為兩端短路的電流，所以待解電路任兩端應以 " 短路 " 表示。

以圖 1-22 為例，應用諾頓等效電路求解待解電路，說明如下：



1 等效電路 R_N 之求法

令所有電源為零，電壓源短路，電流源開路，簡化電路，如圖 1-23 所示。

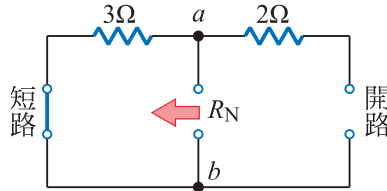


圖 1-23 求解等效電阻之電路

諾頓等效電阻之求法同戴維寧等效電阻之求法： $R_N = 3\Omega$ 。

2 等效電流 I_N 之求法

1. 先令電流源開路，簡化電路如圖 1-24 所示。設短路電流為 I_1 。則：

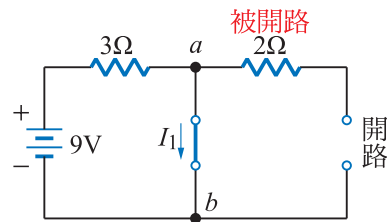


圖 1-24 令電流源為零之簡化電路

短路電流： $I_1 = \frac{9V}{3\Omega} = 3A$ （電流方向向下）

2. 令電壓源為零，簡化電路如圖 1-25 所示。設短路電流為 I_2 ，則：

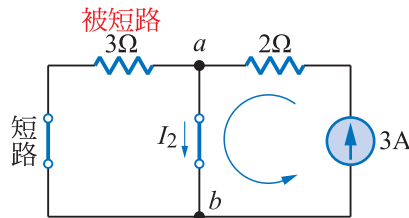


圖 1-25 令電壓源為零之簡化電路

短路電流等於電流源電流， $I_2 = 3A$ （電流方向向下）

3. 諾頓等效電流： $I_N = I_1 + I_2 = 3A + 3A = 6A$ （短路電流方向相同，兩者相加）

諾頓等效電路，如圖 1-26 所示。

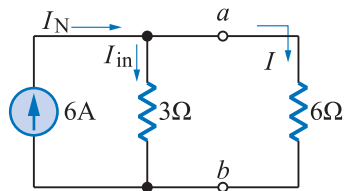


圖 1-26 諾頓等效電路

流經 6Ω 之電流： $I = \frac{3\Omega}{3\Omega + 6\Omega} \times 6A = 2A$ （並聯分流定則）

例題 1-19

在諾頓等效電路中， $I_N = 4A$ ， $R_N = 4\Omega$ ，試求流過 4Ω 待測電阻之電流為多少 A？

解 $I = \frac{4\Omega}{4\Omega + 4\Omega} \times 4A = 2A$ 。

類題演練 1-5

2. 在諾頓等效電路中， $I_N = 3A$ ， $R_N = 4\Omega$ ，試求 8Ω 待測電阻之電壓降為多少 V？

1-5.3 戴維寧與諾頓等效電路之轉換

戴維寧與諾頓等效電路之轉換，如同電壓源與電流源之轉換，如圖 1-27 所示。轉換中，等效電阻值固定，不作變動， $R_{Th} = R_N$ 。等效電壓與等效電流依歐姆定律轉換。

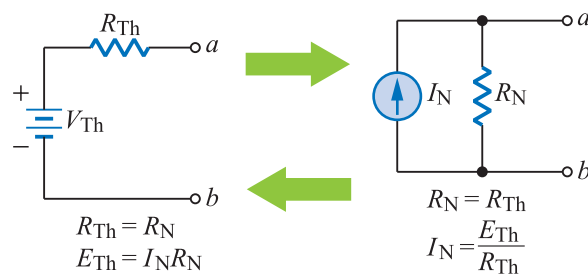
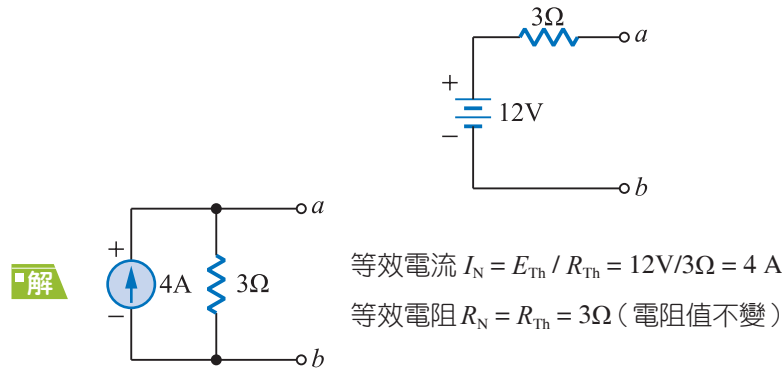


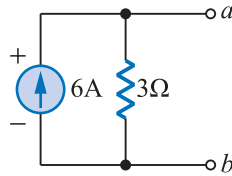
圖 1-27 戴維寧與諾頓等效電路之轉換

**例題 1-20**

如下圖所示為戴維寧等效電路，試將其轉換成諾頓等效電路。

**類題演練 1-5**

3. 如下圖所示為諾頓等效電路，試將其轉換成戴維寧等效電路。

**1-5 隨堂練習**

- () 1. 電壓放大器之電壓增益的單位為
(A) 伏特 (B) 安培 (C) 歐姆 (D) 倍或沒單位。
- () 2. 輸入電壓為 2V，輸出電壓為 10V，電壓放大倍數為
(A) 5 (B) 20 (C) 0.2 (D) 12。
- () 3. 有一電壓放大器之電壓增益為 40dB，試求電壓之放大倍數為多少？
(A) 20 (B) 10 (C) 100 (D) 200。
- () 4. 有一電流放大器之輸出電流為 0.1A，輸入電流為 0.05A，試求電流放大倍數為多少？ (A) 2 (B) 0.2 (C) 5 (D) 0.5。
- () 5. 戴維寧等效電路， $E_{Th} = 12\text{ V}$ ， $R_{Th} = 3\Omega$ ，待測電阻 $R = 9\Omega$ ，試求待測電阻之電壓降為多少 V？ (A) 15 (B) 12 (C) 9 (D) 6。
- () 6. 設輸入電壓為 4V，輸出電壓為 32V，試求電壓放大倍數為多少分貝？
(A) 8 (B) 12 (C) 18 (D) 24。

- I-1**
1. 通常內電阻值為 0Ω 的電壓源，稱理想電壓源。
 2. 電路上之電壓源，若不考慮內電阻的影響，則負載電阻之壓降 V_L 等於供應電壓 E 。
 3. 若考慮內電阻，電路電流會比不考慮內電阻來得小。
 4. 內電阻消耗能量，電流增加時，負載電阻之壓降會下降，兩者成反比。
 5. 電壓調整率可調整電壓之特性，預估輸出電壓的大小。
 6. 電壓調整率（ $VR\%$ ）的定義：

$$VR\% = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\%$$

- I-2**
7. 電流源之符號，以箭頭或符號 I 表示，單位為安培（A）。
 8. 電流源之內電阻以並聯方式連接。
 9. 理想電流源之內電阻為無限大。
 10. 理想電流源之 $V-I$ 曲線為一水平線，電阻值與電壓值成正比。
- I-3**
11. 電阻為對電流的阻力，以" R "作為代號，計算單位為希臘字母" Ω "（讀音"omega"）。
 12. 電阻、電流及電壓三者的關係為： $E = IR$ 。
 13. 電阻值保持定值時，電壓值增加，電流值也增加，兩者成正比。
 14. 電阻與電流成反比，電阻大時，電流變動較小，電阻小時，電流變動較大。
 15. 電容器能將能量用某種形式儲存起來，直到電路需要時，會釋放出來供電路使用。

16. 兩極板上若跨接1伏特的電壓，會儲存1庫侖的電荷，稱電容器儲存的電容量為1法拉。

17. 法拉與毫法拉 (mF) 及微法拉 (μF) 的關係為：

$$1\text{mF} = 10^{-3}\text{F}, 1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}。$$

18. 電容抗之代號為 X_C ，單位為歐姆 (Ω)，關係式為：

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}。$$

19. 電容抗與供電頻率成反比。

1-4 20. 將複雜電路以簡單電路替代，稱簡單電路為複雜電路的等效電路。

21. 等效電路典型的代表電路，有戴維寧等效電路與諾頓等效電路兩種。

22. 放大器 (amplifier) 是指電路上輸入與輸出間之比值關係。

23. 放大器沒有單位，原則上以倍或分貝 (dB) 稱呼。

24. 分貝的關係式：

$$\text{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_o}{P_i}, \text{dB} = 20 \log_{10} \frac{V_o}{V_i}, \text{dB} = 20 \log_{10} \frac{I_o}{I_i}。$$

1-5 25. 戴維寧與諾頓等效電路互換，等效電阻值相等， $R_{\text{Th}} = R_{\text{N}}$ ， $I_{\text{N}} = E_{\text{Th}} / R_{\text{Th}}$ ， $E_{\text{Th}} = I_{\text{N}} \times R_{\text{N}}$ 。

Chapter 1 課後習題

基本題型

I-1 () 1. 如圖 (1) 所示電路，試求電壓源內電阻 R 之電壓降為多少 V？

(A)2 (B)-2 (C)22 (D)-22。

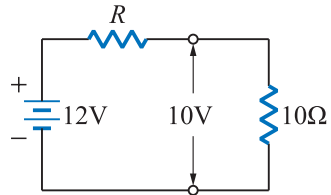


圖 (1)

() 2. 如圖 (1) 所示電路，試求電路電壓調整率 $VR\%$ 為多少？

(A)10% (B)20% (C)0% (D)5%。

() 3. 已知電壓調整率 $VR\% = 5\%$ ，供應電壓 $E = 120V$ ，試求負載電壓為多少 V？ (A)120 (B)118 (C)116 (D)114。

() 4. 如圖 (2) 所示電路，試求電路之電壓調整率為多少 %？

(A)25 (B)20 (C)15 (D)10。

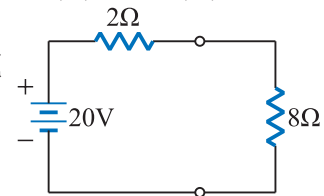


圖 (2)

() 5. 若供應電壓為 110V，在理想狀態下，輸出電壓應為 (A)0V (B)55V (C)110V (D)220V。

() 6. 有一電路，電壓源為 10V，負載電壓為 10V，試求電壓調整率為 (A)1% (B)2% (C)0% (D)0.1%。

I-2 () 7. 理想電流源供應電路之電流 I 若為 2A，試求流入負載之電流 I_L 為多少 A？ (A)2 (B)0 (C)1 (D)4。

() 8. 設負載電阻為 5Ω ，理想電流源供應電路之電流 I 若為 2A，則負載電壓 V_L 為多少 V？

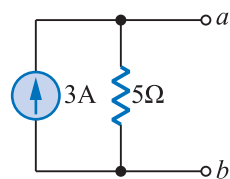
(A)30 (B)20 (C)10 (D)5。

() 9. 有關電壓、電流與電阻三者之關係，下列敘述，何者正確？ (A) 當電阻保持定值，電壓與電流成反比 (B) 當電壓保持定值，電流與電阻成反比 (C) 當電流保持定值，電壓與電阻成反比 (D) 當電壓保持定值，電流與電阻成正比。

- () 10. 電流源為 5A，流入負載電流為 4A，則內電阻電流為
(A)9A (B)-1A (C)-9A (D)1A。
- () 11. 在理想電流源電路，已知負載電流為 2A，則電流源
(A)等於 2A (B)大於 2A (C)小於 2A (D)與 2A 無關。
- () 12. 設電流源為 5A，測得之負載電流為 4A，下列敘述，何者錯誤？
(A)有分流效應 (B)被分流之電流為 -1A
(C)電流源含有內電阻 (D)分流電流為 5A-4A。
- I-3** () 13. 電壓保持定值，電阻與電流成
(A)正比 (B)反比 (C)先正後反比 (D)先反後正比。
- () 14. 電阻為 10Ω，電流為 0.5A，電壓等於
(A)6V (B)4V (C)5V (D)0.2V。
- () 15. 電壓為 12V，希望產生 1A 電流，請問電阻應設計為
(A)20Ω (B)5Ω (C)12Ω (D)8Ω。
- () 16. 電阻由 10Ω 變動到 20Ω，電流固定為 2A，電壓變動之範圍為
(A)20V 至 40V (B)10V 至 20V
(C)10V 至 40V (D)0V 至 40V。
- () 17. 當電源頻率為零時，電容器之電容抗等於
(A)零 (B)50Hz (C)60Hz (D)無限大。
- () 18. 電容量為 18μF 之電容器，在電源頻率為 60Hz 之電路，其電容抗為多少 Ω？
(A)47 (B)84 (C)114 (D)147。
- () 19. 電容抗為 25Ω，電源頻率為 60Hz，試求電容量為多少 μF？
(A)64 (B)72 (C)80 (D)100。
- I-4** () 20. 有關電流放大器之電流增益的單位，下列何者錯誤？
(A)沒單位 (B)安培 (C)分貝 (D)倍。

- () 21. 輸入電壓為 0.2V ，輸出電壓為 50V ，電壓放大倍數為
(A)500 (B)200 (C)250 (D)125。
- () 22. 戴維寧等效電路， $V_{\text{Th}} = 18\text{V}$ ， $R_{\text{Th}} = 3\Omega$ ，待測電阻 $R = 6\Omega$ ，試求待測電阻之電壓降為多少 V ？
(A)15 (B)12 (C)9 (D)6。

- I-5** () 23. 如圖 (3) 所示為諾頓等效電路，若將其轉換成戴維寧等效電路，則 V_{Th} 與 R_{Th} 各為多少？
(A) 15V ， 15Ω (B) 5V ， 15Ω
(C) 5V ， 5Ω (D) 15V ， 5Ω 。



↑ 圖 (3)

進階題型

- I-1** () 1. 設供應電壓為 E ，已知負載電壓 $V_L = 8\text{V}$ ，在理想狀態下， E 的值為
(A) 等於 8V (B) 小於 8V (C) 大於 8V (D) 等於 10V 。
- () 2. 電路之電壓源為 110V ，內電阻為 5Ω ，負載電阻為 50Ω ，試求電壓調整率為
(A)1% (B)5% (C)10% (D)15%。
- I-2** () 3. 實際電流源供應 6A 電流，設流入內電阻電流為 1A ，負載電阻為 50Ω ，試求負載電壓為多少 V ？
(A)250 (B)150 (C)100 (D)50。
- () 4. 有關電壓源，下列敘述，何者為錯？
(A) 電壓值為定值
(B) 理想狀態，內電阻為 0Ω
(C) 內電阻電壓等於負載電壓減去供應電壓
(D) 負載電壓等於負載電流乘上負載電阻。
- I-4** () 5. 有一功率放大器之功率增益為 10dB ，試求功率之放大倍數為多少？ (A)20 (B)10 (C)100 (D)200。



第

2

章

波形

驗證電子電路有兩種方法，一是利用電路之數學式，解析電路之結構，再依相關之數學關係式，求得電路動作之結果；另一是利用電子儀器作層次式的檢測，取得相關之資料，證實電路之結果。量測電路之儀器有三用電表及示波器。三用電表可測得電路之有效值及平均值。示波器可測得電路之峰對峰值。因此，瞭解電路之波形值的涵義，和計算其間之關係，是進入電子領域的不二法門。

本章節次

- 2-1 直流與交流
- 2-2 正弦波
- 2-3 方波
- 2-4 脈波

學習目標

1. 認識直流與交流之差異及其特性。
2. 瞭解直流與交流之電路符號及代號。
3. 瞭解正弦波之形成及瞬間值之數學式。
4. 可以計算正弦波之瞬間值及相關波形值。
5. 可以比較方波與脈波之異同及計算其相關波形值。



2-1 直流與交流

示波器可觀測電路之波形，直流波形是一條水平線，交流波形一般指的是正弦波。正弦波由發電設備，如發電機等提供，應用範圍涵蓋了電力、電子、通訊等商業及工業系統。

交流英文名稱 "alternating"，有交換更替的含意，交流電之波形有正弦波 (sinusoidal waveform) 與非正弦波 (nonsinusoidal waveform) 兩種。非正弦波是由正弦波演變而來，故稱正弦波為交流波形之基本波 (fundamental waveform)。非正弦波的種類有：方波 (square wave)、脈波 (pulse wave)、三角波 (triangular wave)、鋸齒波 (sawtooth wave) 等，如圖 2-1 所示。

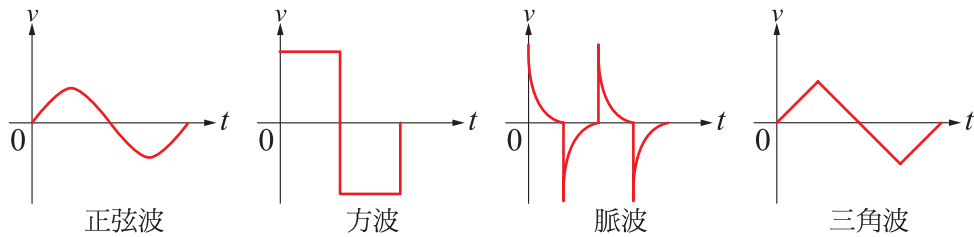


圖 2-1 波形

直流與交流的分辨，有兩種方式：

- (1) 依時間的變動區分：直流值是固定值，不隨時間的改變而變動，如汽車用電瓶供應電壓為 12V，碳鋅電池供應電壓為 1.5V 等。交流值是變動值，隨時間的變動作順序的變化。
- (2) 以表示之符號區分：直流值一般皆以大寫之英文字母表示，如直流電壓值為 " V "，電流值為 " I "，功率值為 " P " 等；交流值一般以小寫之英文字母表示，如交流電壓值為 " v "，電流值為 " i "，功率值為 " p " 等。若交流在變動的狀態，含有時間的因素，可以函數的方式表示，如 $v(t)$ 、 $i(t)$ 等，例如 v_1 表示在 t_1 時間之電壓值 v 。

採用電路電源有兩種方式：固定電壓源，如電瓶電壓或手機電壓等，一般使用直流電；交變電壓源，如電鋸機、油壓機等，一般使用交流電。

交流電廣泛應用在工商業系統，主要在於可因地區或工作需要調整電壓值。交流電使用最多及最具代表性的地方就是家庭，如冰箱或洗衣機使用 AC110V 電壓（110V/220V），冷氣機使用 AC220V 電壓等。在同一個電源系統可供應兩種不同電壓，這是使用交流電之便利性。

交流電應用普遍、廣泛、便利，在電路上正弦波形代表交流的符號，如： \sim 交流電源、 A 交流電流表等。瞭解交流電之特性，應先瞭解交流正弦波之形狀、代表之符號的涵義及用法。現以圖 2-2 所示之交流電壓波形，簡述波形符號表示之涵義如下：

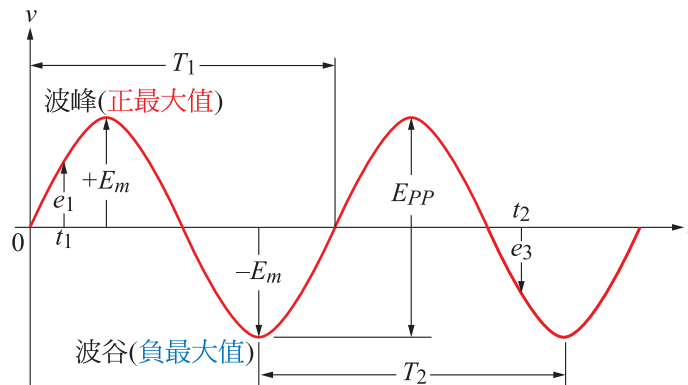


圖 2-2 定義波形值

1 瞬時值 (instantaneous value)

瞬時值指波形上任一時間點產生的交流值，如圖 2-2 所示之符號 e_1 與 e_2 。 e_1 表示在時間為 t_1 時之瞬時電壓值； e_2 表示在時間為 t_2 時之瞬時電壓值。

2 最大振幅 (Peak amplitude)

正弦波之最大振幅，指波形伸展之最高點，共有兩處一正一負，如圖 2-2 所示之 $+E_m$ 與 $-E_m$ ，又稱正弦波之最大值 (maximum value 或 peak value)。波形之最大值為唯一值是固定值，以大寫英文字母表示，如最大電壓值為 " E_m " 或 " V_m "、" E_p " 或 " V_p "，最大電流值為 " I_m " 或 " I_p "。符號之下標字 " m "，全名為 "maximum"。



3 峰對峰值 (peak-to-peak value)

峰對峰值係指正弦波的正波峰至負波峰之間隔值，如圖 2-2 所示 $+E_m$ 至 $-E_m$ 間之電壓值，或正弦波中波峰至波谷間之電壓值，大小值表示為 $+E_m - (-E_m) = 2E_m$ ，是電壓正弦波最大值的 2 倍。峰對峰值是唯一值，以大寫英文字母表示，如電壓之峰對峰值為 " E_{pp} " 或 " V_{pp} "。

4 極性 (polarity)

正弦波之特性為正負半波對稱，如圖 2-2 所示， $+E_m$ 與 $-E_m$ 表示振幅（即大小）相同，極性相反。在交流電路中，電壓極性決定電流之方向，如圖 2-3 所示。

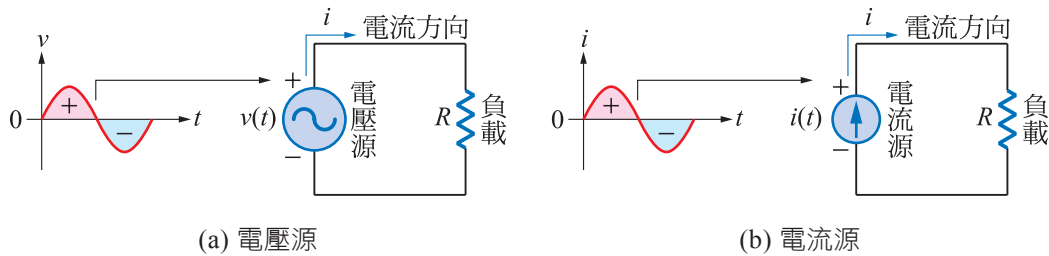


圖 2-3 弦波之正極性表示供應電源之正端

5 週期波 (periodic waveform)

在同一時間內，相同之交流正弦波會重複出現。相同之波形重複出現之情形，稱為週期波。如圖 2-2 所示之正弦波。

6 週期 (period)

在週期波中，兩個相同波形出現之間隔時間，稱為週期，如圖 2-2 所示之 T_1 與 T_2 。依據週期波之定義，可知週期 $T_1 = T_2$ 。決定正弦波之週期，沒有固定之方式，一般是利用週期波上任意二個相似點來決定週期 (T)，如圖 2-4 所示。

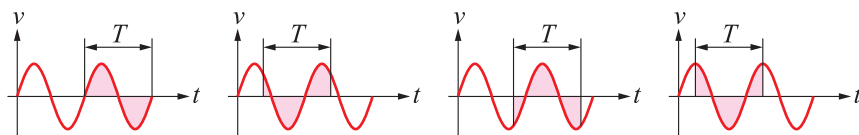


圖 2-4 正弦波上週期之表示法

7 頻率 (frequency)

頻率定義為一秒鐘內相同正弦波出現之次數，符號為 f ，單位為赫芝 (hertz, Hz)。頻率 f 與週期 T 之關係為：

$$1 \text{ 赫芝 (Hz)} = 1 \text{ 週波數 / 秒}, \quad f = \frac{1}{T} \text{ 或 } T = \frac{1}{f}$$

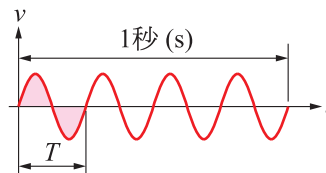
2-1 公式

頻率與週期成反比。如台灣用戶用電之頻率為 60Hz，其週期為 $1/(60\text{Hz}) = 0.0167 \text{ 秒} = 16.7 \text{ 毫秒 (ms)}$ 。

註 頻率為 60Hz，表示在 1 秒鐘內出現相同之正弦波共有 60 個。

例題 2-1

如下圖所示之正弦波，試問正弦波之週期為多少秒？

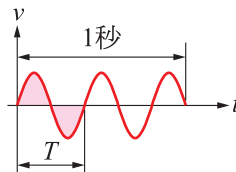


解 如圖所示，1 秒內出現 4 個相同波形，故頻率 $f = 4 \text{ Hz}$ 。則

$$\text{週期: } T = \frac{1}{f} = \frac{1}{4\text{Hz}} = 0.25 \text{ 秒。}$$

例題 2-2

如下圖所示之正弦波，試問正弦波之週期為多少秒？



解 如圖所示，1 秒內出現 2 個半相同波形，故頻率 $f = 2.5 \text{ Hz}$ 。則

$$\text{週期: } T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2.5\text{Hz}} = 0.4 \text{ 秒。}$$



類題演練 2-1

1. 有一正弦波，若 1 秒鐘出現 5 個週期波，試問其週期為多少秒？
2. 若電力公司供應住家之電源為 AC125V、50Hz，試問此交流正弦波之週期為多少秒？



2-1 隨堂練習

- () 1. 供應電路固定之電壓值稱
(A) 直流電 (B) 交流電 (C) 變壓器 (D) 變流器。
- () 2. 三用電表測直流電壓，應撥在
(A) AC (B) DC (C) Ω (D) dB 檔位。
- () 3. 示波器量測直流電，可測得
(A) 交變波形 (B) 脈動波形 (C) 水平線 (D) 斜線。
- () 4. 台灣家庭用電為
(A) 直流電 (B) 交流電 (C) 脈動直流電 (D) 交直流共用電。
- () 5. 頻率與週期的關係
(A) 成正比 (B) 視狀況而定 (C) 成反比 (D) 無法比較。
- () 6. 頻率為 100Hz，週期為多少秒？
(A) 0.01 (B) 0.1 (C) 1 (D) 100。
- () 7. 週期為 0.5 秒，頻率為
(A) 0.02 (B) 0.2 (C) 2 (D) 20 Hz。
- () 8. 某波形，0.02 秒完成 4 週，頻率為
(A) 200 (B) 20 (C) 2 (D) 0.2 Hz。

2-2 正弦波

2-2.1 波形

正弦波之產生是發電機上某一繞組，設定為 AB 繞組，在均勻磁場中旋轉一圈（360 度）時，切割磁場之磁力線產生的感應電勢（ e ）。將感應電勢隨時間之變動作旋轉角度的分佈，可形成如圖 2-5(b) 所示之圖形，此圖形正好與三角函數之正弦波形相同，故稱為正弦波。圖 2-5(a) 為汽車用發電機。

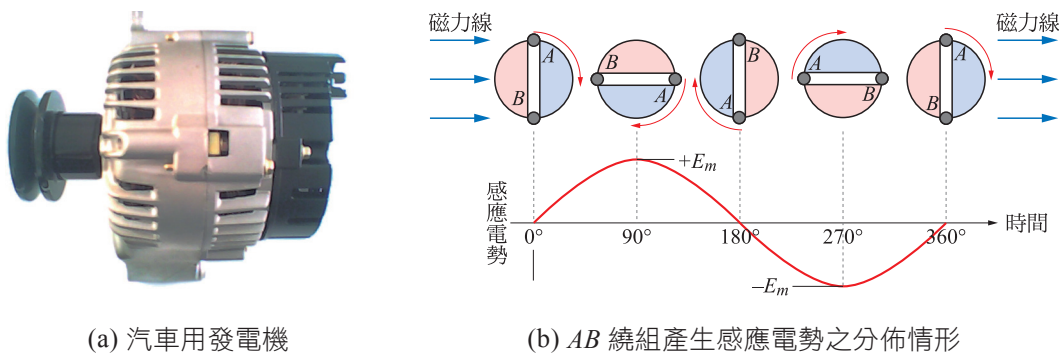


圖 2-5 正弦波之產生及感應電勢與磁場之關係

正弦波有兩個波峰，一正一負，以間隔 180 度區分，兩波峰等高，因此，正弦波是上下波對稱且大小相同的對稱波形。

2-2.2 感應電勢之數學式

如圖 2-6(a) 所示，當繞組旋轉一角度 θ 時，產生感應電勢之瞬時值 e ，對應最大值 E_m 之相對位置，有如直角三角形之斜邊與對邊關係，如圖 2-6(b) 所示。依直角三角函數之正弦關係，感應電勢之瞬時值與最大值的關係式為：

$$\sin \theta = \frac{e}{E_m}$$

2-2 公式

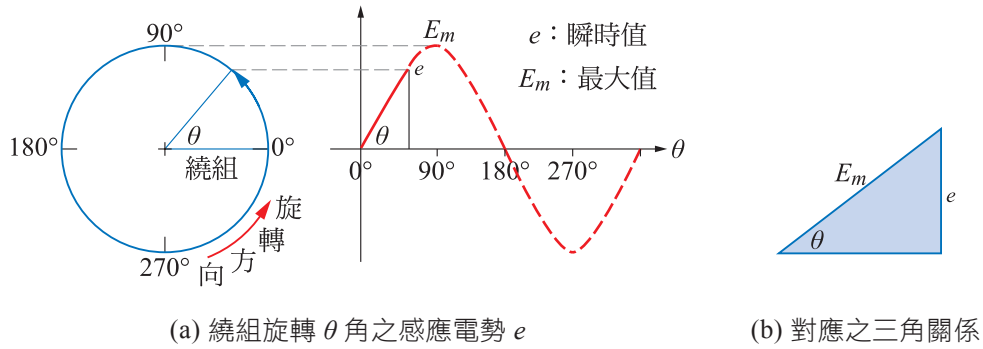


圖 2-6 瞬時值與最大值感應電勢之相對位置

則感應電勢瞬時值的數學式為：

$$e = E_m \sin \theta$$

2-3 公式

式中， e 為感應電勢之瞬時值，單位為伏特， E_m 為感應電勢之最大值，單位為伏特。此式又稱為交流正弦波之一般式。

例題 2-3

感應電勢之一般式為 $v(t) = 10 \sin \theta \text{ V}$ ，當 $\theta = 30^\circ$ 時感應電勢之瞬時值為多少伏特？

解 $v(t) = 10 \sin \theta = 10 \sin 30^\circ = 10 \times \frac{1}{2} = 5 \text{ V}$ 。

類題演練 2-2

1. 感應電勢之一般式為 $v(t) = 15 \sin \theta \text{ V}$ ，當 $\theta = 270^\circ$ 時感應電勢之瞬時值為多少伏特？

1 徑度量與度度量

繞組之旋轉角度有兩種表示方式，一為度度量，一為徑度量，以下說明兩者的關係：

若以座標表示交流正弦波，縱軸以電壓 v 或電流 i 表示，橫軸以角度 (degree) 或徑度 (radian) 表示，如圖 2-7(a)(b) 所示。

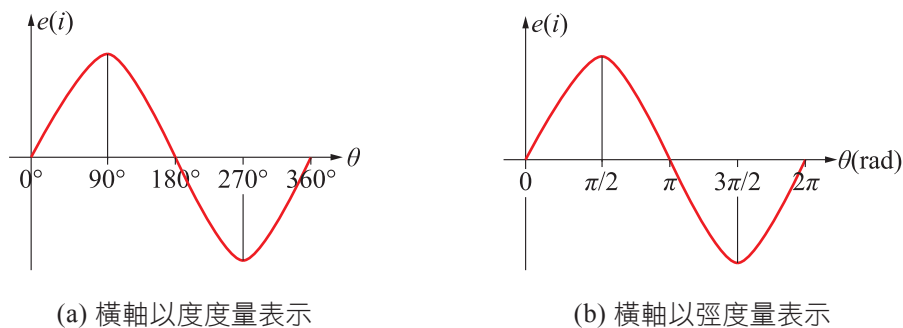


圖 2-7 交流正弦波縱、橫軸之表示法

徑度的定義為圓形的弧長等於圓形的半徑時，圓弧所對應的角度，如圖 2-8 所示之 θ 角。

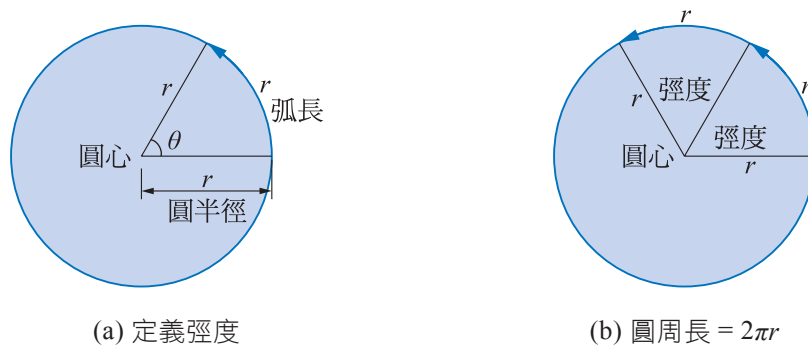


圖 2-8 圓半徑等於弧長時弧長對應之角度為徑度

旋轉一圈表示法，若以度度量為 360 度，以徑度量為 2π ，設圓之半徑為 r ，圓周長為 $2\pi r$ ，則度度量與徑度量之關係為：

2-4 公式

$$\frac{r}{2\pi r} = \frac{\theta}{360^\circ}$$

$$\theta(\text{rad}) = \frac{360^\circ}{2\pi} = \frac{180^\circ}{\pi} = \frac{180^\circ}{3.14} \cong 57.3^\circ : \pi = 3.14159 \cong 3.14$$



可知：(1) 1 弧度 (rad) 量約等於 57.3 倍的度度量，

(2) $360^\circ = 2\pi \rightarrow 1\pi = 180^\circ$ 。則：

弧度量與度度量的換算式為：

$$\text{弧度 (rad)} = \frac{\pi}{180^\circ} \times \text{角度}$$

2-5 公式

$$\text{角度 (degree)} = \frac{180^\circ}{\pi} \times \text{弧度}$$

例題 2-4

試將度度量 45° 、 180° 轉換成弧度量。

■解

$$(1) 45^\circ = 45^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ} \text{ rad} = \frac{\pi}{4} \text{ rad} ;$$
$$(2) 180^\circ = 180^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ} \text{ rad} = \pi \text{ rad} \circ$$

例題 2-5

試將弧度量 $2\pi/3$ 、 π 轉換為度度量。

■解

$$(1) \frac{2\pi}{3} = \frac{2\pi}{3} \times \frac{180^\circ}{\pi} = 120^\circ ; (2) \pi = \pi \times \frac{180^\circ}{\pi} = 180^\circ \circ$$

類題演練 2-2

2. 已知圓角度為 135° ，試求以弧度量表示為多少？
3. 有一角度以弧度量表示為 $4\pi/3 \text{ rad}$ ，若以度度量表示為多少？

2 角速度 (ω)

圓之半徑若以向量表示，則半徑向量繞著圓心旋轉的速度，稱為角速度 (angular velocity)，以希臘字母 ω 表示，設 θ 為旋轉之角度，則依速度的關係式，角速度可定義為：

$$\omega = \frac{\text{角度或徑度}}{\text{時間 (秒)}} = \frac{\theta}{t}$$

2-6 公式

式中， $\theta = \omega t$ ，依式 (2-5)，感應電勢之瞬時值，為：

$$e = E_m \sin \theta = E_m \sin \omega t \quad \text{或} \quad v = V_m \sin \theta = V_m \sin \omega t$$

徑度量與度量的轉換，則角速度之關係式可改為：

$$\omega = \frac{\theta}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

2-7 公式

式中， ω 為角速度，單位為徑 / 秒 (rad/sec)， t (或 T) 為時間，單位為秒， f 為頻率，單位為赫芝。依關係式：角速度與徑度量及頻率成正比，而與時間 (週期) 成反比。

例題 2-6

我國用電之頻率為 60Hz，試問發電機旋轉之角速度為多少徑 / 秒？

解 角速度之數學式： $\omega = 2\pi f = 2 \times 3.14 \times 60 \text{ Hz} \approx 377$ 徑 / 秒 (rad/sec)。

例題 2-7

單相電機之頻率為 60Hz，試問電機旋轉 5ms 內，所旋轉之角度為多少徑？多少度？

解 $\theta = 2\pi ft = \omega t$
 $\theta = 2 \times 3.14 \text{ rad} \times 60 \text{ Hz} \times 5 \times 10^{-3} \text{ s} = 1.88 \text{ rad}$
 1 徑 = 57.3 度，則： $1.88 \text{ rad} \times 57.3^\circ \approx 108^\circ$ 。

註 這裡之旋轉角度為徑 (rad)。

**例題 2-8**

有一弦波電壓信號之一般式為： $v(t) = 10 \sin 314 t \text{V}$ ，試問：(1) 電壓之最大值 V_m ，(2) 角速度，(3) 頻率，(4) 週期，(5) $t = 5 \text{ms}$ (毫秒) 之瞬間電壓值各為多少？

■解 交流電壓之一般式為： $v = V_m \sin \omega t$ ，則

(1) 電壓之最大值： $V_m = 10 \text{V}$ ；

(2) 角速度： $\omega = 314 \text{rad/sec}$ ；

(3) 頻率： $\omega = 2\pi f$ ， $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{314}{2 \times 3.14} = 50 \text{Hz}$ ；

(4) 週期： $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50\text{Hz}} = 0.02 \text{s} = 20\text{ms}$ (毫秒) ；

(5) $v(0.005) = 10 \sin 314 \times 5 \times 10^{-3} \times 57.3^\circ = 10 \sin 90^\circ = 10\text{V}$ 。

類題演練 2-2

4. 若電路之頻率為 100Hz ，試求角速度為多少徑 / 秒？

5. 若交流電壓最大值 $V_m = 15 \text{V}$ ，頻率為 50Hz ，試求 $t = 10 \text{ms}$ 之瞬間電壓值為多少伏特？

2-2.3 波形值

1 平均值

依波形之形態，波形平均值的求法有二種：非正弦波與正弦波。說明如下：

1. 非正弦波

如果一個人開車，在 4 小時內共走了 300 公里，計算開車的平均速度為：

$$\text{平均速度} = \frac{300\text{km}}{4\text{hr}} = 75 \text{ km/hr}$$

平均每小時 (hr) 開車的速度為 75 公里 (km)。以圖 2-9(a) 表示，縱軸表示里程，橫軸表示開車時數。在相同的距離及開車時數，

也可以不同的開車速度，達成相同之平均速度，如圖 2-9(b) 所示，縱軸表示開車速度，橫軸表示開車時數。4 小時內，前 2 小時開車速度為每小時 100 公里，休息 1 小時後，再以每小時 100 公里開車 1 小時。開車之平均速度計算為：

$$\begin{aligned} \text{平均速度} &= \frac{100\text{km/hr} \times (2\text{hr} - 0) + 100\text{km/hr} \times (4\text{hr} - 3\text{hr})}{4\text{hr}} \\ &= \frac{200\text{km} + 100\text{km}}{4\text{hr}} = 75\text{km/hr} \end{aligned}$$

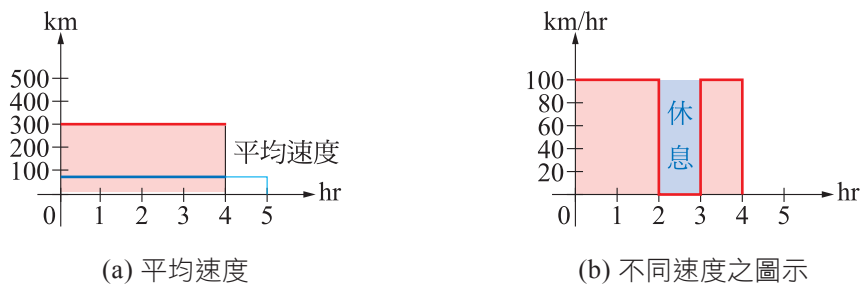


圖 2-9 開車速度對時間之圖形

依據圖 2-9 所示為開車速度與時間之圖示，歸納求得平均速度的關係式，為：

$$\text{平均速度} = \frac{\text{曲線下面積的和}}{\text{曲線長度}}$$

2-8 公式

將此求得平均速度的觀念，應用到求電壓或電流的平均值，以圖 2-10 說明：

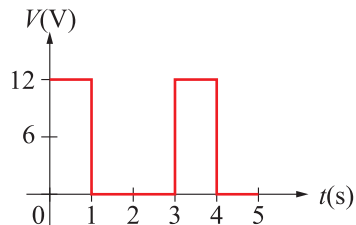


圖 2-10 平均值電壓

- (1) 設曲線下的面積為 A ，則 $A = 12\text{V} \times 1\text{s} = 12 \text{Vs}$ 。
- (2) 曲線長度：（在時間軸上，指相同圖形之間隔。） $3\text{s} - 0 = 3\text{s}$ 。



(3) 設電壓之平均值為 V_{av} : $V_{av} = \frac{12Vs}{3s} = 4V$

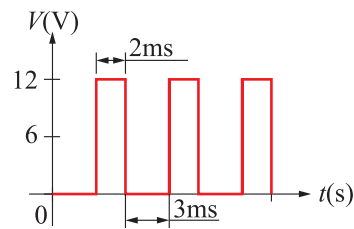
以上所述，歸納波形圖求取平均值的關係式為：（設下式以電壓之平均值為例）

$$V_{av} = \frac{\text{曲線下面積的和}}{\text{週期}} = \frac{\Sigma A}{T}$$

2-9 公式

例題 2-9

試求下圖之電壓平均值為多少伏特？

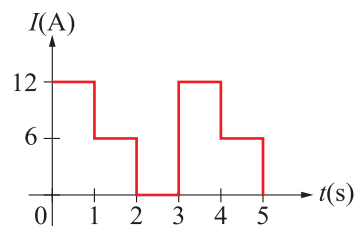


■解 圖示：週期： $T = 2ms + 3ms = 5ms$ 。

$$V_{av} = \frac{12V \times 2ms}{5ms} = \frac{24V}{5} = 4.8V。$$

例題 2-10

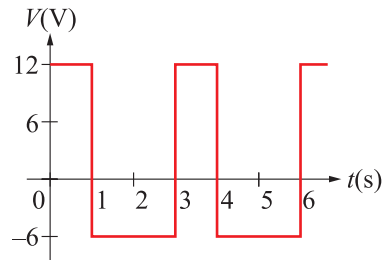
試求下圖之電流平均值為多少安培？



■解 $I_{av} = \frac{12A \times 1s + 6A \times (2s - 1s)}{3s} = \frac{18As}{3s} = 6A。$

例題 2-11

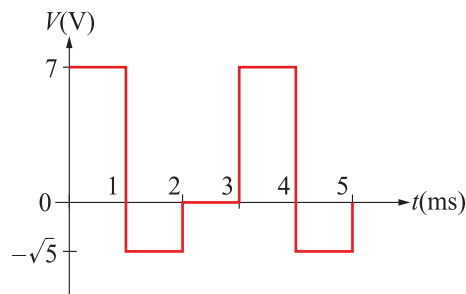
試求下圖之電壓平均值為多少伏特？



解
$$V_{av} = \frac{12\text{V} \times 1\text{s} + (-6\text{V}) \times (3\text{s} - 1\text{s})}{3\text{s}} = \frac{12\text{Vs} - 12\text{Vs}}{3\text{s}} = 0\text{V}。$$

類題演練 2-2

6. 如圖為電壓 $v(t)$ 之交流週期性波形，其平均值為何？



2. 正弦波

正弦波是正半週與負半週上下對稱的波形，如圖 2-11(a) 所示。設正半週波形之面積為 A_m ，負半週之面積為 $-A_m$ ，週期為 T ，依式 2-9，正弦波之平均值為：

$$V_{av} = \frac{\text{曲線下面積之和}}{\text{週期}} = \frac{A_m + (-A_m)}{T} = 0\text{V}$$

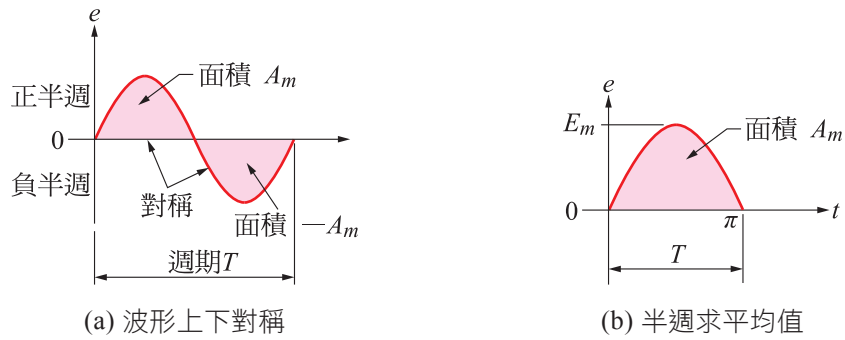


圖 2-11 正弦波平均值求解

正弦波若以全週期計算平均值，其值為零。故，上下對稱之波形，均採用半週之波形計算平均值，如圖 2-11(b) 所示。設 E_m 為正弦波之最大值，則正弦波平均值之計算，採用積分數學式（註：積分之解法，請參閱附錄二），得：

$$A_m = 2E_m$$

2-10 公式

正弦波半波之面積等於 2 倍的最大值，設半週作為一週期 T ，則平均值電壓為：

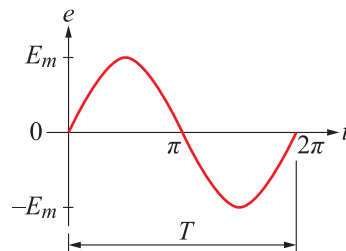
$$V_{av} = \frac{\text{半週波形面積}}{\text{半週期}} = \frac{2E_m}{T} = \frac{2}{\pi} E_m = 0.637 E_m$$

2-11 公式

正弦波之平均值等於最大值的 $2/\pi$ 倍，或 0.637 倍。

例題 2-12

如圖所示為正弦波之波形圖，試求其平均值為多少？



解 依式 2-10，半波波形之面積為最大值的 2 倍，即 $2E_m$ ，則平均值為：

$$V_{av} = \frac{A}{T} = \frac{2E_m + (-2E_m)}{2\pi} = \frac{0}{2\pi} = 0$$

上下波形對稱之正弦波，總面積等於 $2E_m + (-2E_m) = 0$ ，所以平均值等於零。

2-2.4 全波波形之平均值

如圖 2-12 所示，在 2π 時間內，出現兩個正半波之波形稱為全波波形。設 A 為半波波形面積， E_m 為最大值， T 為週期，全波波形平均值 V_{av} 的求法為：

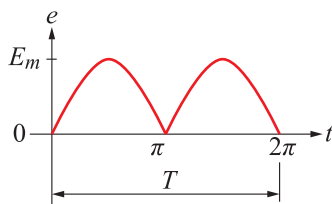


圖 2-12 全波波形圖

$$V_{av} = \frac{A}{T} = \frac{2E_m + 2E_m}{2\pi} = \frac{4E_m}{2\pi} = \frac{2}{\pi} \times E_m = 0.637E_m$$

2-12 公式

全波波形的平均值等於正弦波最大值的 0.637 倍。

2-2.5 半波波形之平均值

如圖 2-13 所示為半波波形圖。半波指一週期內僅出現半週弦波之波形。圖示之半波為正半週，負半週沒有信號。設 A 為半波波形面積， E_m 為最大值， T 為週期，半波之平均值 V_{av} 的求法為：

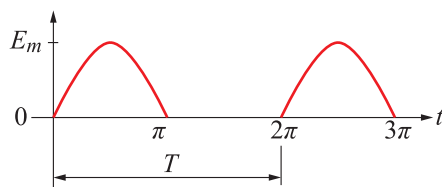


圖 2-13 半波波形圖

$$V_{av} = \frac{A}{T} = \frac{2E_m + 0}{2\pi} = \frac{2E_m}{2\pi} = 0.318E_m$$

2-13 公式

半波波形之平均值為正弦波最大值的 0.318 倍，或為全波的一半。

**例題 2-13**

有一正弦波之峰值（最大值） $V_m = 10\text{V}$ ，試求 (1) 全波，(2) 半波之平均值各為多少伏特？

- 解
- (1) 全波之平均值： $V_{av} = 0.637 V_m = 0.637 \times 10\text{V} = 6.37\text{V}$ ；
 - (2) 半波之平均值： $V_{av} = 0.318 V_m = 0.318 \times 10\text{V} = 3.18\text{V}$ ；
 - (3) 比較全波與半波之平均值： $6.37\text{V}/3.18\text{V} = 2$ ，全波之平均值等於半波的 2 倍。

例題 2-14

有一弦波電壓之一般式為 $v = 15 \sin\omega t \text{ V}$ ，試求弦波之平均值為多少伏特？

- 解
- 由一般式得知電壓之最大值 $V_m = 15\text{V}$ 。
平均值： $V_{av} = 0.637 V_m = 0.637 \times 15\text{V} = 9.56\text{V}$ 。

類題演練 2-2

7. 弦波之最大值為 100V ，試求弦波之平均值為多少伏特？

2-2.6 有效值

1 正弦波之求法

有效值（effective value）又稱為均方根值（root mean square，rms），電壓與電流之有效值符號分別為 V_{rms} 或 E_{rms} 與 I_{rms} 。交流儀表如數位式三用電表撥在 AC 檔位，量測之值即為有效值。在使用上，除非使用之交流電有特別強調是瞬間值、最大值或平均值等，否則指示的電壓或電流值都是有效值，如插頭上標示 "AC125V"，指的是交流有效值電壓為 125V 。

正弦波求解有效值有二種方法，一為實驗法，一為均方根求法。說明如下：

1. 實驗法

電路上之電流 I 流過電阻 R ，電阻會發熱，稱電阻在消耗熱功率 P ， $P = I^2 R$ 。消耗功率與流經電流之平方成正比，單位為瓦特。若將交流電流和直流電流流經同一顆電阻，在電阻上兩者消耗相同之功率時，稱直流之電流值為交流之有效值。

利用上述電阻消耗功率發熱之現象，有效值可作實驗求得，如圖 2-14 所示電路。在水盆內放一顆電阻器 R ，開關 s_1 串接直流電源 E ，開關 s_2 串接交流電源 v ，將直、交流電源並接後再並接至電阻器。

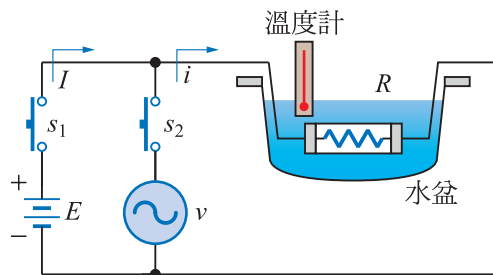


圖 2-14 有效值之實驗法

實驗量測：

(1) 首先量測直流方面消耗之功率：

閉合開關 s_1 ，直流電流 I 流經電阻 R ，依消耗能量 W 之計算式： $W = I^2 R t$ ，電阻產生之功率 $P = I^2 R$ ，經一段時間 t 後，會產生熱能，熱能量將使水溫上升，用溫度計量測水溫並記錄下來。完成後，打開開關 s_1 ，讓水冷卻一段時間。

(2) 量測交流方面消耗之功率：

閉合開關 s_2 ，交流電流 i 流經電阻 R ，電阻消耗功率使水溫開始上升。當 (1)(2) 項量測之水溫相等時，表示直流與交流電消耗之功率相等。設直流消耗之功率為 P_{DC} ，交流消耗之功率為 P_{ac} ，則：

$$P_{DC} = P_{ac}$$

2-14 公式



計算交流消耗之功率：設交流電流的一般式為： $i = I_m \sin \omega t$ A。

$$P_{ac} = i^2 R = (I_m \sin \omega t)^2 R = I_m^2 R \sin^2 \omega t$$

2-15 公式

因： $\sin^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t)$

註：倍角公式： $\cos 2\theta = 1 - 2\sin^2 \theta$ 。

故： $P_{ac} = I_m^2 \left[\frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t) \right] R$

$$P_{ac} = \frac{I_m^2 R}{2} - \frac{I_m^2 R}{2} \cos 2\omega t$$

2-16 公式

正弦波的特性之一，正、負半週相同且對稱，所以，在交流功率的傳送中，式(2-16)第2項之功率正負相互抵消而為零，則交流之消耗功率為：

$$P_{ac} = \frac{I_m^2 R}{2}$$

2-17 公式

直流之消耗功率為： $P_{DC} = I^2 R$ 。交、直流消耗之功率相等，則：

$$P_{ac} = \frac{I_m^2 R}{2} = P_{DC} = I^2 R$$

2-18 公式

消去電阻 R ： $\frac{I_m^2}{2} = I^2$

兩邊取根號： $\sqrt{I^2} = \sqrt{\frac{I_m^2}{2}} \rightarrow I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m = 0.707 I_m$

2-19 公式

歸納實驗及計算結果：交流計算式，有效值等於最大值的 0.707 倍。

例題 2-15

家用交流電器標示為：AC110V，60Hz，試問電壓之最大值為多少伏特？

■解 交流電器未強調 AC110V 為何值，一般 110V 表示為 "有效值"。則：

$$V = 0.707 V_m = 110 \text{ V}, V_m = \frac{110\text{V}}{0.707} = 155.6\text{V}, \text{ 或 } V_m = \sqrt{2}\text{V} = 1.414 \times 110\text{V} = 155.6\text{V}。$$

例題 2-16

有一正弦波電流之一般式為 $i = 2\sin\omega t \text{A}$ ，試求電流之有效值為多少安培？

■解 交流電流之最大值為 $I_m = 2 \text{ A}$ ，則有效值為：

$$I = 0.707 I_m = 0.707 \times 2\text{A} = 1.414\text{A}。$$

類題演練 2-2

8. 三用電表撥在 "ACV" 檔測得電壓為 100V，試求最大電壓值為多少伏特？

2. 均方根之求法

交流電壓之有效值又稱均方根值 (root-mean-square, 簡稱 rms)。均方根值的計算過程是先將週期函數平方，求出面積再除以週期，作法類似求取非正弦波之平均值，最後再開根號。若以功率計算有效值，因 $P = V^2/R = I^2 R$ ，電路之功率 P 與電壓 V 或電流 I 的平方值成正比。所以，計算電流的有效值時，也是先取其平方值，經平均後再開根號，即：

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

2-20 公式

電壓之計算方式，和電流相同。如圖 2-15 所示，設電流弦波之波形面積為 A ，經積分公式求得面積為：

$$A = I_m^2 \times 2\pi$$

2-21 公式

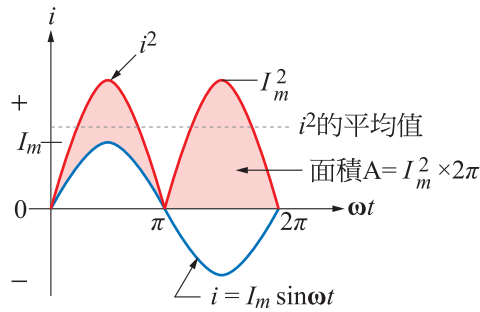


圖 2-15 均方根值之解法

設弦波之週期為 T ，則均方根值之解法為：

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{A}{T}} \quad \text{2-22 公式}$$

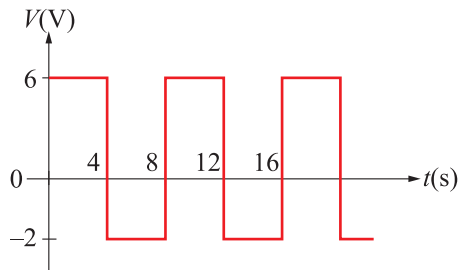
若將有效值算法的波形組合起來，電流均方根值解法之關係式為：

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{A}{T}} = \sqrt{\frac{I_1^2 \times t_1 + I_2^2 \times t_2 + \dots + I_n^2 \times t_n}{T}} \quad \text{2-23 公式}$$

式中，電流 I_1 至 I_n 表示各區間波形的有效值，時間 t_1 到 t_n 表示各區間波形佔用之時間， T 為相同波形間之週期。電壓均方根之求法同式 (2-23)。

例題 2-17

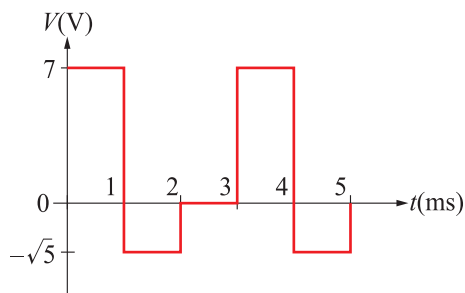
如下圖之波形，試求一週期內電壓之有效值為多少伏特？



解 $V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{6^2 \times 4 + (-2)^2 \times 4}{8}} = \sqrt{20} \text{V} = 4.47 \text{V}$ 。

例題 2-18

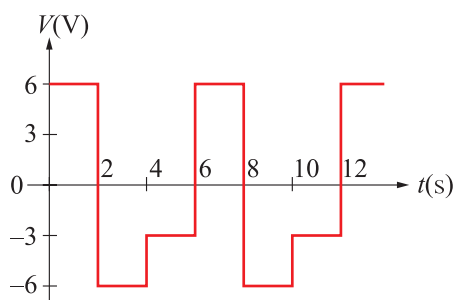
如下圖所示波形為電壓之交流週期性波形，試問有效值為多少伏特？



解
$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{7^2 \times 1 + (-\sqrt{5})^2 \times 2}{3}} = \sqrt{18} = 3\sqrt{2} \text{ V} \circ$$

類題演練 2-2

9. 如下圖所示之波形，試求電壓之有效值為多少伏特？





2-2 隨堂練習

- () 1. 有一正弦波，若 0.2 秒鐘出現 10 個週期波，試問其週期為多少秒？
(A)2 (B)0.02 (C)5 (D)50。
- () 2. 有個插座寫著 "AC125V、60Hz"，試問週期為多少秒？
(A)0.017 (B)0.17 (C)1.7 (D)17。
- () 3. 有一交流電機之電壓弦波式為 $v = 10 \sin(100t + 30^\circ)$ V，試求 $t = 0$ 秒之瞬時值電壓為多少伏特？
(A)1 (B)10 (C)5 (D)7。
- () 4. 有一弦波電壓為 $v = 10 \sin 377t$ V，試求峰對峰電壓及頻率各為多少？
(A)10V，60Hz (B)20 V，50 Hz
(C)10 V，50 Hz (D)20 V，60 Hz。
- () 5. 如圖 (1) 所示，設繞組之角速度為 ω ，試求弦波之週期為多少？
(A)3.14 (B)6.28 (C)31.4 (D)62.8 毫秒。

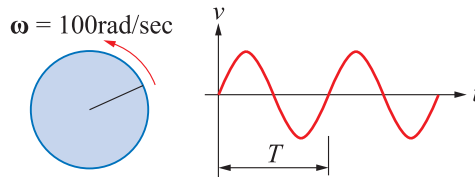


圖 (1)

- () 6. 有一交流電機之電壓弦波式為 $v = 10 \sin 100t$ V，電機旋轉 10ms 之瞬間電壓約為多少伏特？
(A)10.2 (B)8.4 (C)6.6 (D)4.2。
- () 7. 如圖 (2) 所示波形，試求平均值電流為多少安培？
(A)10 (B)20 (C)5 (D)1。

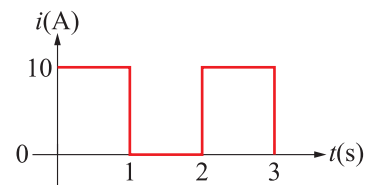


圖 (2)

() 8. 如圖 (3) 所示波形，試求平均值電流為多少安培？

(A)4 (B)8 (C)2 (D)6。

() 9. 如圖 (2) 所示波形，試求有效值電流為多少安培？

(A) $\sqrt{2}$ (B) $\sqrt{20}$ (C) $\sqrt{5}$ (D) $\sqrt{50}$ 。

() 10. 如圖 (3) 所示波形，試求有效值電流為多少安培？

(A) $\sqrt{52}$ (B) $\sqrt{22}$ (C) $\sqrt{12}$ (D) $\sqrt{8}$ 。

() 11. 某正弦交流電壓之最大值為 100 伏特，則其電壓之有效值為

(A)63.6 (B)70.7 (C)100 (D)141.4 伏特。

() 12. 一正弦交流電壓之有效值為 110V，則此正弦波形之峰對峰值為

(A)99V (B)155.6V (C)220V (D)311.1V。

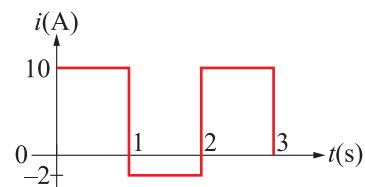


圖 (3)



2-3 方波

方波又稱矩形波，屬於非正弦波。方波在數位電子中，常作為控制或偵測訊號。理想的方波，如圖 2-16 所示之波形上下對稱而且相同。圖中，波形沿時間行進，由 O 點急速上升至 A 點，保持 A 點值至 B 點，又急速下降至 C 點，再保持 C 點值至 D 點，然後又急速上升回至 G 點，形成上下邊平坦而兩邊界陡峭的波形。方波波形只有 "高" 和 "低" 兩值。依波形行進方向，陡峭的上升邊稱為前緣或正緣。陡峭的下降邊稱為後緣或負緣。

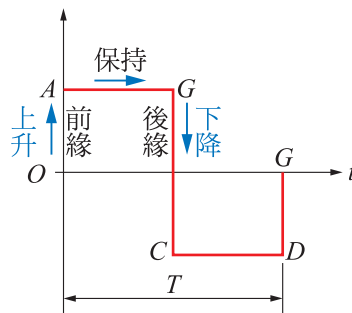


圖 2-16 方波

方波分成對稱方波與不對稱方波兩種。正、負半週佔用時間相等者稱為對稱方波；佔用時間不相等者稱為不對稱方波。

2-3.1 工作週期

方波的特性是工作週期 (duty cycle) 為 50%，如圖 2-17 所示波形。方波之工作週期的關係式為：

$$\text{工作週期} = \frac{t_w}{T} \times 100\% = 50\%$$

2-24 公式

式中， t_w 表示方波正半週的時間寬度， t_s 表示空間時間寬度， T 為方波的週期。一週期的方波，正半週的時間寬度與空間的時間寬度相等，兩者各等於週期的一半，經計算結果，標準方波之工作週期固定為 50%。

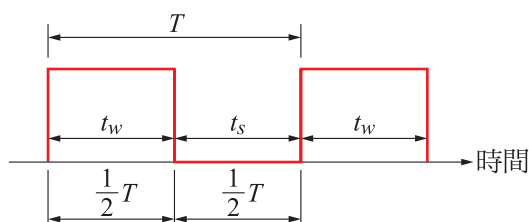


圖 2-17 方波之工作週期固定為 50%

2-3.2 波形值

按正弦波之波形值，有峰對峰值、峰值、有效值及平均值等。討論方波之波形值，如圖 2-18 所示之波形，說明如下：

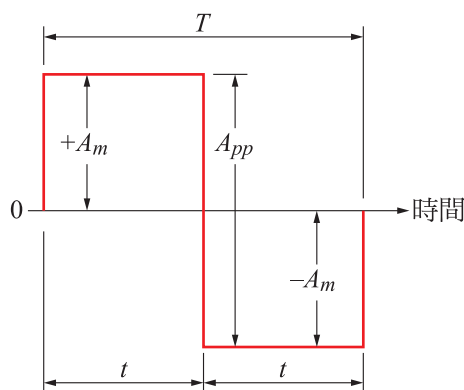


圖 2-18 方波之波形值

設 $+A_m$ 與 $-A_m$ 為方波之正、負半週的峰值 (最大值)， A_{pp} 為峰對峰值。方波之峰對峰值是正波峰至負波峰間距，即

$$A_{pp} = +A_m - (-A_m) = 2A_m$$

可知，方波之峰對峰值為峰值或最大值的 2 倍。

1 平均值

依式 (2-9) 所示，求平均值的一般式為：設 C_{av} 為平均值。

$$C_{av} = \frac{\text{曲線下面積之和}}{\text{週期}} = \frac{\Sigma A}{T}$$

$$C_{av} = \frac{A_m \times t + (-A_m) \times t}{T} = 0$$

2-25 公式



如同對稱之正弦波，方波因上下波形對稱，峰值相同，故平均值為 0。

2 有效值

依式 (2-22) 求取有效值的一般式為：設 C_{rms} 為有效值。

$$C_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\text{面積}}{\text{週期}}}$$

2-26 公式

$$C_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{(A_m)^2 \times t + (-A_m)^2 \times t}{T}} = \sqrt{\frac{A_m^2(t+t)}{T}} = \sqrt{\frac{A_m^2 \times T}{T}} = \sqrt{A_m^2} = A_m$$

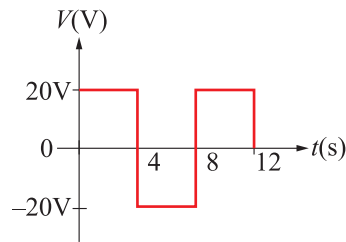
可知，方波之有效值等於峰值或最大值。應用至電壓或電流，得知：

$$V_{\text{rms}} = V_m \text{ 或 } I_{\text{rms}} = I_m$$

2-27 公式

例題 2-19

如下圖所示為標準方波波形，試求波形之峰對峰值、最大值、平均值及有效值各為多少伏特？



■解

由波形圖可知，最大值 $V_m = 20 \text{ V}$ ，週期 $T = 8 \text{ s}$

峰對峰值： $V_{\text{p-p}} = 2V_m = 2 \times 20 \text{ V} = 40 \text{ V}$

平均值： $V_{\text{av}} = \frac{20 \times 4 + (-20) \times (8-4)}{8} = \frac{80-80}{8} = 0 \text{ V}$

有效值： $V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{(20)^2 \times 4 + (-20)^2 \times 4}{8}} = \sqrt{\frac{3200}{8}} = \sqrt{400} = 20 \text{ V}$ 。

2-3.3 方波之量測

在電子電路量測電壓之儀器，有三用電表與示波器兩種。三用電表有指針型與數位型兩種。依電表電路之結構，指針型三用電表的電路為整流型電路，數字刻度是依據正弦波的有效值製定，若用指針型三用電表量測方波，因方波有諧波之成分，量測結果會產生很大的誤差。數位型三用電表為直流電壓驅動式，內部結構有整流、濾波電路，若量測方波之結果，也會有很大的誤差。因此，量測方波之儀器，最好使用示波器。

如圖 2-19 所示為示波器顯示方波之波形，若電壓旋鈕調整至每格 (DIV) 為 5 V，時間旋鈕調整至每格為 5ms (毫秒)，方波電壓之最大值，由時間軸 (中間部位) 算起至波峰，共佔用 2 格，則 $V_m = 5 \text{ V/DIV} \times 2 \text{ DIV} = 10\text{V}$ 。週期由時間軸之第 1 格算起至第 5 格，共佔用 5 格 - 1 格 = 4 格，則 $T = 5 \text{ ms/DIV} \times 4 \text{ DIV} = 20\text{ms}$ 。此方波之波形值各為：

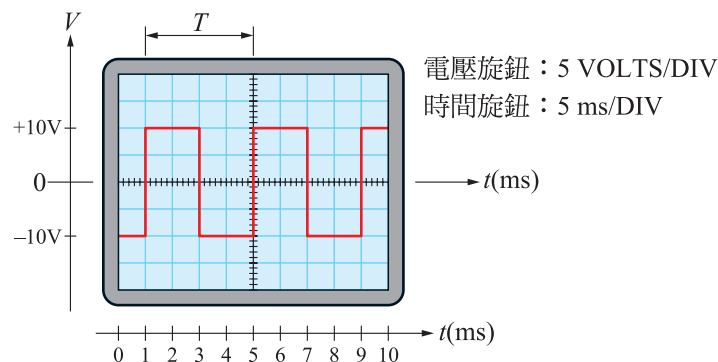


圖 2-19 示波器量測方波之圖形

峰對峰值電壓： $V_{p-p} = 10 \text{ V} \times 2 = 20 \text{ V}$

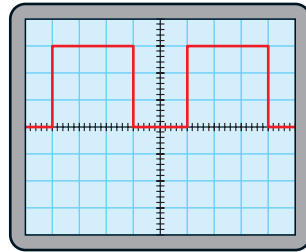
平均值電壓： $V_{av} = \frac{10 \times 10 + (-10) \times 10}{20} = \frac{100 - 100}{20} = 0\text{V}$

有效值電壓： $V = \sqrt{\frac{10^2 \times 10 + (-10)^2 \times 10}{20}} = \sqrt{\frac{2000}{20}} = \sqrt{100} = 10\text{V}$



例題 2-20

如下圖所示為示波器顯示之方波波形，試求方波之最大值、平均值及有效值各為多少伏特？



電壓旋鈕：5 VOLTS/DIV
時間旋鈕：2 ms/DIV

解 最大值電壓共佔 3 格，則 $V_m = 5 \text{ V/DIV} \times 3 \text{ DIV} = 15 \text{ V}$
週期共佔 5 格，則 $T = 2 \text{ ms/DIV} \times 5 \text{ DIV} = 10 \text{ ms}$

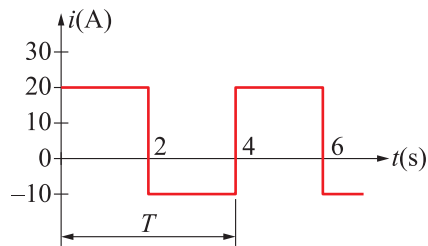
平均值電壓： $V_{av} = \frac{15 \times 6}{10} = 9 \text{ V}$

有效值電壓： $V_{rms} = \sqrt{\frac{15^2 \times 6}{10}} = \sqrt{\frac{1350}{10}} = \sqrt{135} = 11.6 \text{ V}$

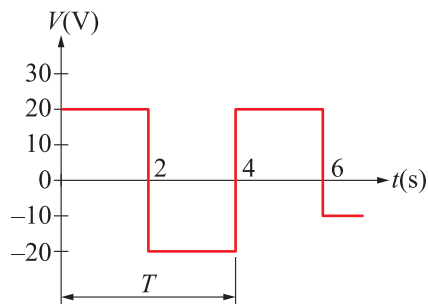
- 由例題可知：(1) 對稱方波之平均值為 0，有效值等於最大值。
(2) 不對稱方波，平均值不為 0，有效值不等於最大值。

類題演練 2-3

1. 如下圖所示之矩形波，試求波形之平均值及有效值各為多少安培？



2. 如下圖所示之標準方波，試求方波之平均值及有效值各為少伏特？



2-3 隨堂練習

- () 1. 方波之工作週期為 50%，表示
 (A) 脈波寬度 = 週期 (B) 脈波寬度 = 空間寬度
 (C) 脈波寬度 ≠ 空間寬度 (D) 空間寬度 = 週期。
- () 2. 如圖 (1) 所示之對稱方波，試求其平均值及有效值各為多少 V？
 (A) 0, 20 (B) 0, -20 (C) 0, 10 (D) 0, -10。
- () 3. 如圖 (2) 所示為不對稱方波，試求其平均值及有效值各為多少 V？
 (A) 0, $\sqrt{62.5}$ (B) 2.5, $\sqrt{62.5}$
 (C) 0, $\sqrt{22.5}$ (D) 2.5, $\sqrt{22.5}$ 。
- () 4. 如圖 (3) 所示為不對稱方波，試求波形之平均值與工作週期各為多少？
 (A) 10V, 33.33% (B) 15V, 33.33%
 (C) 10V, 16.67% (D) 15V, 16.67%。

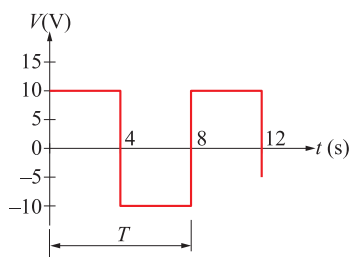


圖 (1)

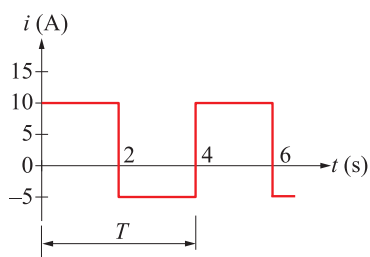


圖 (2)

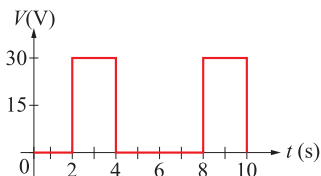


圖 (3)



2-4 脈波

脈波 (pulse) 是一種突發性的波形。脈波依行進方向，有週期性與非週期性兩種波形；依動作有正向與負向兩種波形；依基準線有正極性與負極性兩種波形。脈波之波形如圖 2-20 所示。圖 2-21 所示為不同基準線的正向與負向脈波。

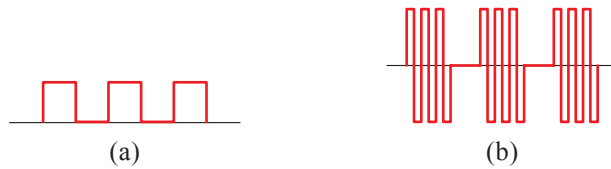


圖 2-20 脈波

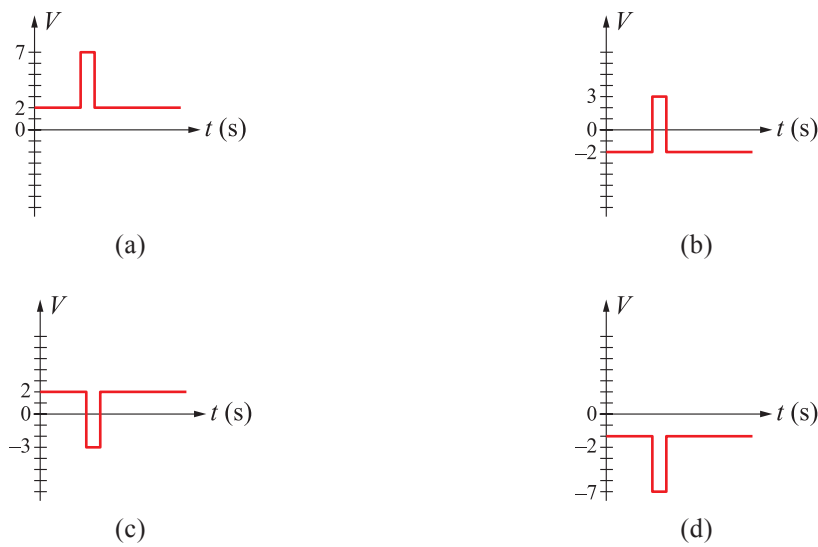


圖 2-21 不同基準線的正向和負向脈波

2-4.1 波形

脈波常用在數位電路，作為邏輯關係運作的準位。在邏輯電路中，脈波可由一穩定的邏輯狀態迅速轉換成另一個邏輯狀態，再經一段時間後，又回復原來的狀態。在數位電路中，常工作在延遲及觸發電路上；週期性的脈波，則用作計時器或同步系統所需的時脈波。

如圖 2-22 所示為脈波波形。脈波最高準位與最低準位之間隔，稱為脈波幅度。由最低準位升至最高準位稱為脈波正緣；由最高準位降至最低準位稱為脈波負緣。脈波幅度的 10% 至 90% 所需之時間稱為上升時間 (t_r)；脈波幅度的 90% 至 10% 所需之時間稱為下降時間 (t_f)。在數位電路中，輸出脈波之上升及下降時間越短，表示數位電路之反應速度越快。

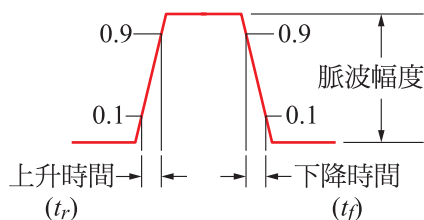


圖 2-22 脈波的正緣與負緣

如圖 2-23(a)(b) 所示，脈波之種類是以基準線 (baseline) 作為參考；以脈波幅度之最低值作為基準線，稱為正向脈波 (positive-going pulse)。正向脈波之電壓或電流值依先升後降或先大後小作為變化。以脈波幅度之最大值作為基準線，稱為負向脈波 (negative-going pulse)。負向脈波之電壓或電流值依先降後升或先小後大作為變化。

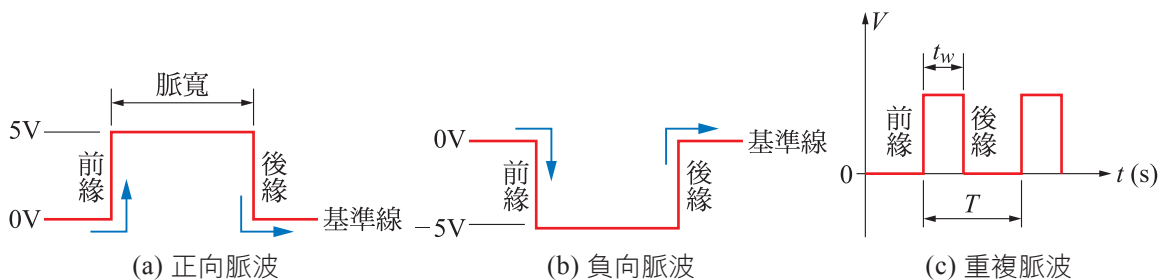


圖 2-23 脈波之種類



1 重複脈波

如圖 2-23(c) 所示，相同脈波以週期性之重複出現，稱為重複脈波。在固定時間內，相同脈波重複出現之次數，稱為頻率 (f)，單位是赫芝 (hertz, Hz)，頻率亦可解釋為相同脈波在 1 秒內出現之次數 (次 / 秒)。相同脈波之時間間隔，稱為週期 (period, T)，單位為秒 (second, s)。頻率與週期成反比，兩者之關係式為：

$$f = \frac{1}{T} \text{ 或 } T = \frac{1}{f}$$

2-28 公式

2-4.2 工作週期

如圖 2-24 所示為週期性脈波。週期性脈波以脈波幅度 50% 處所經歷的時間長度，稱為脈波寬度 (pulse width, PW)；相同脈波之間隔稱為空間寬度 (space width, SW)。相同脈波之間隔時間，稱為脈波週期 (T)，脈波寬度與週期之比稱為工作週期 (duty cycle)。在控制系統中，週期性脈波經常被用作各電路動作的時間基準，工作週期則作為各電路工作時間的長短。工作週期的關係式為：

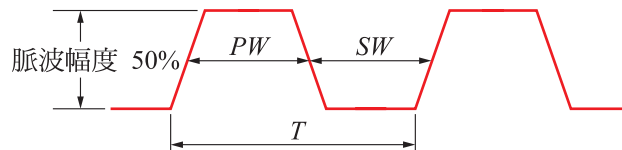


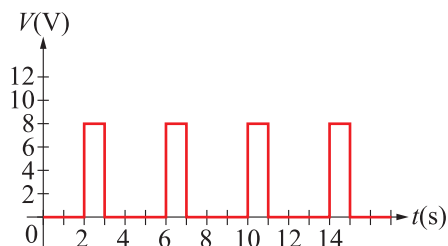
圖 2-24 週期性脈波

$$\text{工作週期 \%} = \frac{PW}{T} \times 100\% = \frac{PW}{PW + SW} \times 100\%$$

2-29 公式

例題 2-21

如圖所示為週期性脈波波形，試求脈波之平均值、有效值及工作週期各為多少？



解 依圖可知： $V_m = 8\text{V}$ ， $T = 6\text{s} - 2\text{s} = 4\text{s}$

$$PW = 3\text{s} - 2\text{s} = 1\text{s}，SW = 6\text{s} - 3\text{s} = 3\text{s}$$

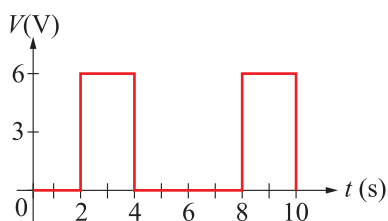
$$\text{平均值：} V_{av} = \frac{8 \times 1}{4} = 2\text{V}$$

$$\text{有效值：} V = \sqrt{\frac{8^2 \times 1}{4}} = \sqrt{\frac{64}{4}} = \sqrt{16} = 4\text{V}$$

$$\text{工作週期 \%} = \frac{1}{1+3} \times 100\% = 0.25 \times 100\% = 25\%。$$

類題演練 2-4

1. 如下圖所示之波形，試求波形之平均值與工作週期各為多少？





2-4 隨堂練習

- () 1. 工作週期固定為 50% 的是
(A) 脈波 (B) 方波 (C) 正弦波 (D) 三角波。
- () 2. 方波之平均值，因上下波對稱，則其平均值等於
(A) 有效值 (B) 最大值 (C) 無限大 (D) 零。
- () 3. 如圖 (1) 所示波形，試求平均值為多少伏特？
(A) 5 (B) 2.5 (C) 8 (D) 4。

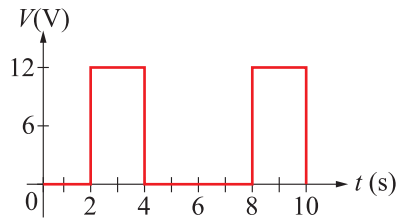


圖 (1)

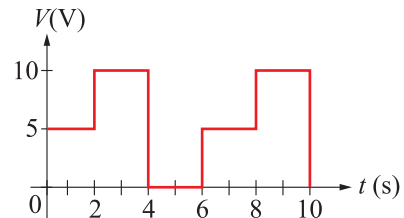


圖 (2)

- () 4. 如圖 (2) 所示波形，試求工作週期為多少 % ？
(A) 22.23 (B) 33.34 (C) 55.56 (D) 66.67。
- () 5. 如圖 (3) 所示波形，試求波形之平均值為
(A) 0V (B) 10V (C) 20V (D) 100V。

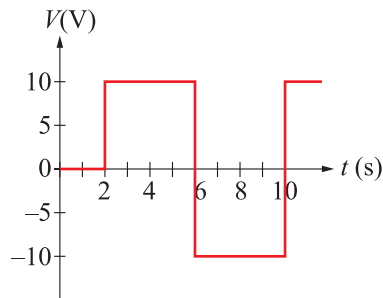


圖 (3)

- () 6. 如圖 (3) 所示波形，試求波形之有效值為
(A) 0V (B) 10V (C) 20V (D) 100V。

- 2-1
1. 直流值是固定值，不隨時間的改變而變動，如汽車用電瓶供應電壓為12V。
 2. 交流值是變動值，隨時間的變動作順序的變化。
 3. 瞬時值指波形上任一時間點上產生的交流值，如 e_1 表示在時間為 t_1 時之瞬時電壓值。
 4. 正弦波之最大振幅，指波形伸展之最高點。
 5. 峰對峰值指弦波間正波峰至負波峰間隔值，如 E_m 至 $-E_m$ 間電壓值，是電壓弦波最大值的2倍，如電壓之峰對峰值為" E_{PP} "或" V_{PP} "。
 6. 正弦波之特性為正負半波對稱，如 $+E_m$ 與 $-E_m$ 表示振幅（即大小）相同，極性相反。
 7. 在同一時間內，相同之交流正弦波會重複出現。相同之波形重複出現之情形，稱為週期波。
 8. 在週期波中，兩個相同波形出現之間隔時間，稱為週期。
 9. 頻率定義為一秒鐘內相同弦波出現之次數，符號為 f ，單位為赫芝（hertz，Hz）。
 10. 頻率 f 與週期 T 之關係為：
1赫芝(Hz) = 1週波數/秒， $f = \frac{1}{T}$ 或 $T = \frac{1}{f}$ 。頻率與週期成反比。
- 2-2
11. 正弦波是發電機之轉子，在磁場中旋轉一圈之感應電勢隨時間變動的分佈圖。
 12. 交流感應電勢的一般式為： $v(t) = V_m \sin \theta$ 。

13. 徑度的定義為圓形的弧長等於圓形的半徑時，圓弧所對應的角度。
14. 徑度與角度的換算式為：
- $$\text{徑度 (rad)} = \frac{\pi}{180^\circ} \times \text{角度} ; \text{角度 (degree)} = \frac{180^\circ}{\pi} \times \text{徑度}。$$
15. 單一繞組視成半徑向量繞著圓心旋轉，旋轉之速度稱為角速度，以希臘字母 ω 表示。
16. 角速度 $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ ，與頻率 f 成正比，與週期 T 成反比。
17. 波形之平均值的一般式為： $V_{av} = \frac{\text{曲線下面積之和}}{\text{週期}} = \frac{\Sigma A}{T}$ 。
(以電壓為例)
18. 交流全波波形之平均值為： $V_{av} = 0.637V_m$ ，為最大值的0.637倍。
19. 交流半波波形之平均值為： $V_{av} = 0.318V_m$ ，是全波的一半值。
20. 波形之有效值的一般式為： $I_{rms} = \sqrt{\frac{\text{面積}}{\text{週期}}}$ 。(以電流為例)
21. 交流弦波之有效值為： $V = 0.707V_m$ ，為最大值的0.707倍。有效值又稱均方根值。
- 2-3 22. 方波由正弦波與奇次諧波組合而成。方波有對稱與不對稱兩種型式。
23. 對稱方波的工作週期固定為50%。平均值為零，有效值等於最大值。
24. 量測方波應用示波器，三用電表因方波具有諧波成分，量測值之誤差較大。

- 2-4 25. 脈波是突發性的波形，應用作控制系統之時脈信號或觸發信號。
26. 在數位電路中，輸出脈波之上升及下降時間越短，表示數位電路之反應速度越快。
27. 表列波形值之關係式。波形以對稱（或標準）波形為主。

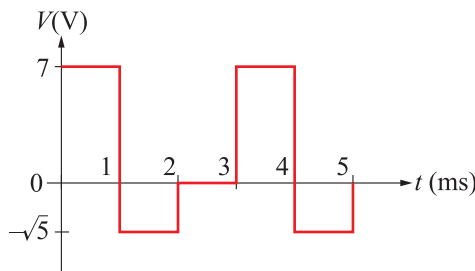
波形型態	最大值 (E_m, I_m)	有效值 ($E_{\text{rms}}, I_{\text{rms}}$)	平均值 ($E_{\text{av}}, I_{\text{av}}$)
正弦波	E_m, I_m	$\frac{1}{\sqrt{2}} E_m, \frac{1}{\sqrt{2}} I_m$	$\frac{2}{\pi} E_m, \frac{2}{\pi} I_m$
方波	E_m, I_m	E_m, I_m	0, 0

- 註 1. $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707, \frac{2}{\pi} = 0.636$
2. 若為直流電，則 $E_{\text{rms}} = E_{\text{av}} = E_m$ 。

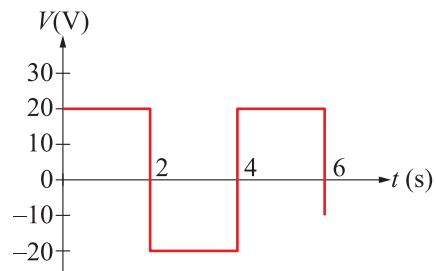
基本題型

- 2-1 () 1. 對交流電之敘述，下列何者錯誤？
 (A) 為一週期性之電流 (B) 瞬時值之大小隨時間而變化
 (C) 極性亦隨時間而變化 (D) 極性不變。
- () 2. 一正弦波之角速度為 314 徑 / 秒，則其週期為
 (A) 0.318 秒 (B) 0.02 秒 (C) 0.0167 秒 (D) 0.1 秒。
- () 3. 正弦波交變電流 $i = I_m \sin(\omega t + \theta) \text{A}$ ， i 稱為電流之
 (A) 最大值 (B) 有效值 (C) 平均值 (D) 瞬時值。
- 2-2 () 4. 有效值為 10 伏特之正弦電壓，其峰對峰值為
 (A) $10\sqrt{2}$ 伏特 (B) $20\sqrt{2}$ 伏特 (C) 10 伏特 (D) 20 伏特。
- () 5. 設以 $v(t) = 100\cos 377t \text{V}$ 表示交流電壓，則此交流電壓之有效值為
 (A) 100V (B) 70.7V (C) 141.4V (D) 110V。
- () 6. 一正弦波經全波整流後，測得其峰對峰值電壓為 200V，則其均方根值 (rms) 為
 (A) 14.14V (B) 28.28V
 (C) 70.7V (D) 63.7V。
- () 7. 通常用來測量交流電路之電壓表，其所測得之數值代表
 (A) 平均值 (B) 有效值 (C) 峰值 (D) 峰對峰值。
- () 8. 一正弦波之峰對峰值為 200V，該正弦之平均值應為
 (A) 100V (B) 70.7V (C) 63.7V (D) 50V。
- () 9. 有效值為 100 伏特之交流電壓，其平均值為
 (A) 80V (B) 90V (C) 112V (D) 124V。
- () 10. 當家用電壓為 110V 時，其最大值為
 (A) 78V (B) 99V (C) 110V (D) 156V。
- () 11. 正弦波之最大值與平均值之比值為
 (A) 1.11 (B) $\pi / 2$ (C) $2 / \pi$ (D) $1 / \sqrt{2}$ 。

- () 12. 在一交流正弦電路中，電流之平均值為 3A ，則其有效值為
 (A) $3\sqrt{2}\text{A}$ (B) 3.33A (C) 3A (D) $3/\sqrt{2}\text{A}$ 。
- () 13. 有效值為 110V 之交流正弦波，其平均值為多少？
 (A) 89.2V (B) 99.0V (C) 99.6V (D) 106V 。
- () 14. 電流 $i = 70.7\sin 377t\text{A}$ ，則其有效值為
 (A) 70.7A (B) 100A (C) 50A (D) 75A 。
- () 15. 目前家庭用電均採用 110V 電壓源，此電壓源意指
 (A) 平均值 (B) 最大值 (C) 瞬時值 (D) 有效值。
- () 16. 一正弦波交流電之頻率為 60Hz ，則其完成交流一週所需之時間為
 (A) 50 秒 (B) 60 秒 (C) $1/50$ 秒 (D) $1/60$ 秒。
- () 17. 如圖 (1) 所示，試求波形一週期之平均值為多少安培？
 (A) 1.5 (B) 2.5 (C) 1 (D) 0.5 。



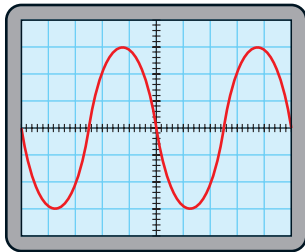
↑ 圖 (1)



↑ 圖 (2)

- () 18. 如圖 (2) 所示之方波電壓波形，其有效值電壓為何？
 (A) 10V (B) $10\sqrt{2}\text{V}$ (C) 20V (D) $20\sqrt{2}\text{V}$ 。

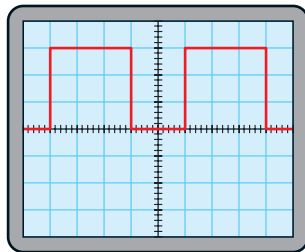
- () 19. 如圖 (3) 所示為正弦波之電壓波形，試求平均值與有效值分別為
 (A) 4.8V，5.3V (B) 4.8V，10.6V
 (C) 9.6V，5.3V (D) 9.6V，10.6V。



電壓旋鈕：5 VOLTS/DIV
 時間旋鈕：2 ms/DIV

↑ 圖 (3)

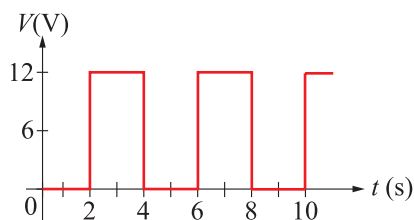
- 2-3 () 20. 如圖 (4) 所示為示波器測得方波電壓波形，試求工作週期為 (A) 33.3% (B) 17.7% (C) 66.7% (D) 50%。



電壓旋鈕：2 VOLTS/DIV
 時間旋鈕：10 ms/DIV

↑ 圖 (4)

- 2-4 () 21. 如圖 (5) 所示波形，試求平均值為多少伏特？
 (A) 5 (B) 2.5 (C) 8 (D) 4。
- () 22. 如圖 (5) 所示之波形圖，試求波形之有效值為多少伏特？
 (A) $\sqrt{5}$ (B) $\sqrt{50}$ (C) $\sqrt{4}$ (D) $\sqrt{40}$ 。
- () 23. 如圖 (5) 所示之脈波形，試求其工作週期為多少 %？
 (A) 25 (B) 40 (C) 50 (D) 60。



↑ 圖 (5)

進階題型

- 2-2 () 1. 有一電壓方程式為 $e = 141\sin 314t$ V，問其頻率為若干？
(A)314 (B)120 (C)60 (D)50 赫芝。
- () 2. 有一弦波電壓信號的一般式為 $v(t) = 10\sqrt{2} \cos(6280t + 60^\circ)$ 伏特，則此電壓信號的週期與有效值分別為
(A)10ms， $10\sqrt{2}$ (B)10ms，10V
(C)1ms， $10\sqrt{2}$ V (D)1ms，10V。
- () 3. 5 歐姆的電阻器加上 $v = 100\sqrt{2} \sin \omega t$ 伏特的電壓時，則電路內通過的電流之有效值為
(A)20 (B) $20\sqrt{2}$ (C) $20/\sqrt{2}$ (D)40 安培。
- () 4. 若交流電流波形為正弦波曲線，則該電流之有效值為平均值的 (A)0.636 (B)0.707 (C)1.11 (D)1.414 倍。
- () 5. 100V 交流電經半波整流後，其有效值及平均值分別為
(A)100V，0V (B)50V，31.8V
(C)70.7V，31.8V (D)70.7V，45V。
- () 6. 電壓 $v(t) = 100\sqrt{2} \sin 120t$ 伏特之有效值為
(A)90V (B)100V (C)110V (D)120V。
- () 7. 對於一交流電壓 $v(t) = 100\sin(314t + 60^\circ)$ V，下列何者錯誤？
(A) $V_m = 100$ V (B) $V_{\text{rms}} = 70.7$ V
(C) $f = 314$ Hz (D) 電壓波形為弦波波形。
- () 8. 某波形，在 8 毫秒內完成 2 週，則其頻率為
(A)125Hz (B)250Hz (C)400Hz (D)160Hz。
- () 9. 某甲使用交流電壓表量測電路電壓為 141.4 V，而以直流電表量測之讀值為 127.4 V，則此電壓波形為
(A) 三角波 (B) 矩形波 (C) 正弦波 (D) 鋸齒波。

- () 10. 如圖 (6) 所示的電壓波形圖，試求電壓之平均值
 (A) 1 (B) -1 (C) 2 (D) -2 伏特。

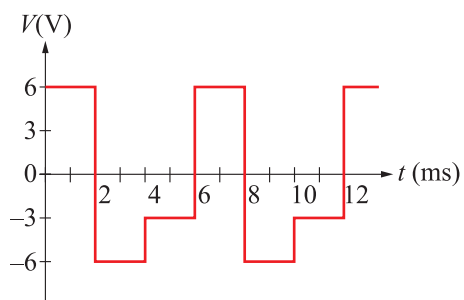


圖 (6)

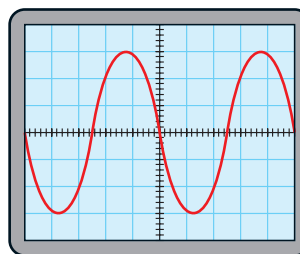


圖 (7)

- () 11. 使用 1 : 1 探棒量測頻率為 40Hz 且均方根值為 4.24V 的交流電，示波器上顯示的波形如圖 (7) 所示，試問此示波器的水平刻度與垂直刻度分別為何？
 (A) 2 ms/DIV，2 V/DIV (B) 5 ms/DIV，2 V/DIV
 (C) 5 ms/DIV，1 V/DIV (D) 4 ms/DIV，1 V/DIV。

第

3

章

半導體

半導體是電子產品之基本材料，常用之半導體元件有矽及鍺。矽因耐溫高、特性穩定而成為半導體之基本材料。藉由矽材質之特性說明，可以瞭解半導體及其應用，最後，再瞭解二極體之製造過程，對於電子產品會有進一步的認識。

本章節次

- 3-1 半導體的特性
- 3-2 P 型半導體
- 3-3 N 型半導體
- 3-4 二極體製造

學習目標

1. 認識物體之基本結構及其種類之差異。
2. 瞭解半導體之基本結構及其特性。
3. 瞭解 P 型與 N 型半導體之形成及其特性。
4. 可以簡單說出 P 型與 N 型半導體之基本結構和特性。
5. 認識 PN 接面二極體之組成及其特性。
6. 瞭解二極體之製造過程及相關產品。



3-1 半導體的特性

在日常生活中常見之休閒及生活用品，如手機、電腦之主機板、微處理器及記憶體、數位相機、汽車用主機板、衛星導航系統等之積體電路（IC），半導體是基本元件。晶圓（Wafer）是 IC 基本元件的材料。晶圓是矽（Si）半導體集成電路製作時所用的矽晶片，因製品之形狀為圓形，故稱為晶圓。晶圓片依不同尺寸，可製成數十到數百顆的 IC 半導體，如圖 3-1 所示，半導體經封裝測試廠完成測試、切割、封裝，就成為半導體成品。成品由電腦等不同廠商生產成各式半成品或成品。

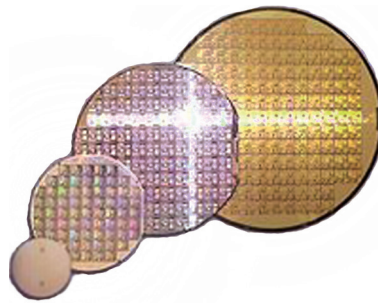
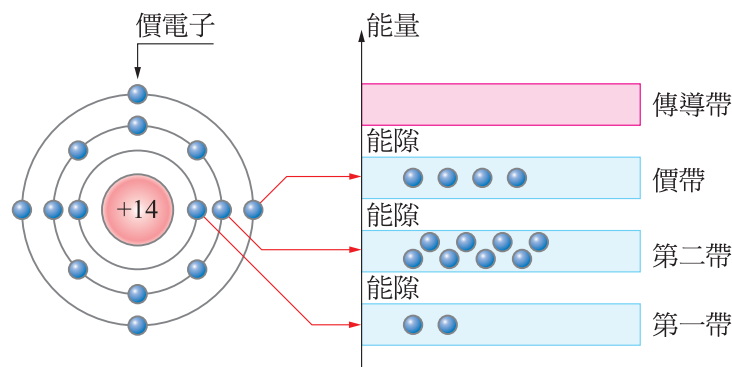


圖 3-1 晶圓（2、4、6、8 吋，來源：維基百科）

物質（體）由原子群組合而成。原子的結構，以帶十四價的矽原子為例，如圖 3-2(a) 所示。原子中心為原子核，圍繞原子核的是電子軌道。各層電子軌道的電子數量，依原子核由內往外數，分別為 2 個、8 個及 4 個，共有 14 個電子。矽原子最外層為四價電子。



(a) 單一原子結構

(b) 原子以能階的方式存在

3-1.1 導電性

單獨矽原子的電子是以能階 (energy level) 的形式存在, 如圖 3-2(b) 所示。當矽原子間交互作用形成矽晶體時, 彼此間之電子能階, 也會接觸並相互重疊形成能帶 (energy band)。在原子間停止交接作用時, 能帶會分裂形成上下兩塊, 一為傳導帶 (conduction band), 一為價帶 (valence band)。傳導帶與價帶間分隔的距離, 稱為能隙 (energy gap, E_g), 能隙的單位是電子伏特 (eV), 如圖 3-3 所示。

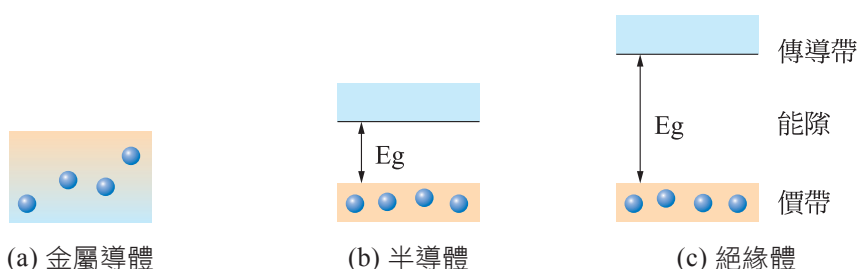


圖 3-3 物質以能隙區分為導體、半導體及絕緣體 (來源: 維基百科)

在正常情況下, 電子都在價帶活動, 稱價電子 (valence electron)。價電子指在原子內最外層軌道上的電子。電子要成為自由電子, 必須克服能隙, 從價帶進入傳導帶, 成為傳導電子。要克服能隙就要吸收最低的能量。通常能隙的寬度小於 3 電子伏特 (eV) 者為半導體, 以上為絕緣體, 導體幾乎沒有能隙。

- 註 (1) 1 電子伏特 (eV) 為帶電量 = 1.602×10^{-19} 庫侖的電子, 移動一伏特之電位, 所需的能量。
 (2) $1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}$ 焦耳, 電子伏特為能量單位。
 (3) 表 3-1 所示為導體、半導體、絕緣體依能隙劃分之關係。

表 3-1

名稱	價電子數	能隙寬度	原子性質	材料實例
導體	小於 4	幾乎為 0eV	易於失去電子	金、銀、銅、鐵等
半導體	等於 4	小於 3 eV	失去等於獲得電子	鍺、矽、或砷化鎵化合物
絕緣體	大於 4	大於 3 eV	不易失去電子	石英、雲母、塑膠等

半導體之導電性介於導體與絕緣體間, 因電子數與質子數相等, 淨電荷為零, 半導體不導電, 為電中性。



例題 3-1

以價電子數區分導體、半導體及絕緣體，半導體最外層軌道之價電子數為何？

■解 半導體等於四價電子。

例題 3-2

能隙的單位為電子伏特，能隙小於 3 電子伏特的是何種物質？

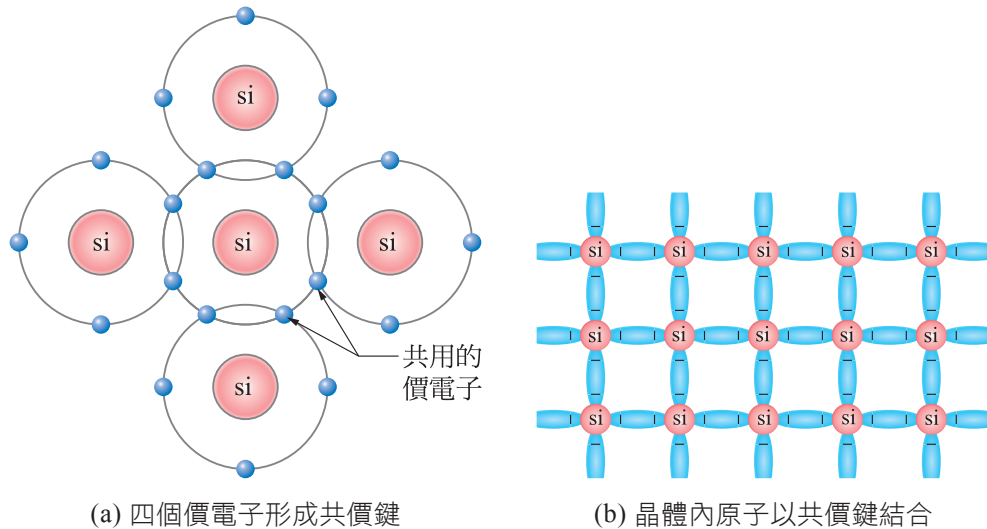
■解 半導體的能隙寬度小於 3 電子伏特。

類題演練 3-1

1. 銅屬於導體，其價帶間之能隙等於多少電子伏特？
2. 價帶與傳導帶之間隔，稱之為何？其單位為何？

3-1.2 共價鍵

在矽晶體內相鄰的矽原子，各以四個價電子相互共用，進行共價鍵 (covalent bonds) 結合，形成八隅體。依八隅體規則，指最外層電子軌道具有八個價電子，各原子間會透過分享或交換電子，結合成八個價電子達到平衡穩定。如此，各原子間經過結合作用，使得整塊的矽為結晶狀的材料，如圖 3-4(a)(b) 所示。經共價鍵結合的矽晶體，相當於每一原子具有八價電子，因此，形成穩定的化學性。



例題 3-3

簡述各矽原子間結合成為矽晶體之過程。

解 矽原子最外層電子軌道帶有四價電子，依八隅體規則，原子間起交互作用時，原子會提供四價電子與鄰近原子進行共價鍵結合，最外層軌道結合成八個價電子時，晶體會呈穩定狀態。

3-1.3 自由電子與電洞

在室溫（25°C）下，矽原子各價帶之電子皆會吸收熱能，提昇本身的能量，將由原來之能帶，進入上層的能帶，如價帶進入傳導帶成為傳導電子，或稱自由電子，如圖 3-5(a)(b) 所示。在傳導帶的自由電子受原子核的束縛較小，可以在晶體內自由移動。由價帶進入傳導帶之電子，會在價帶上留下電洞，如此，產生一個自由電子即多出一個電洞稱電子－電洞對，兩者成對產生。

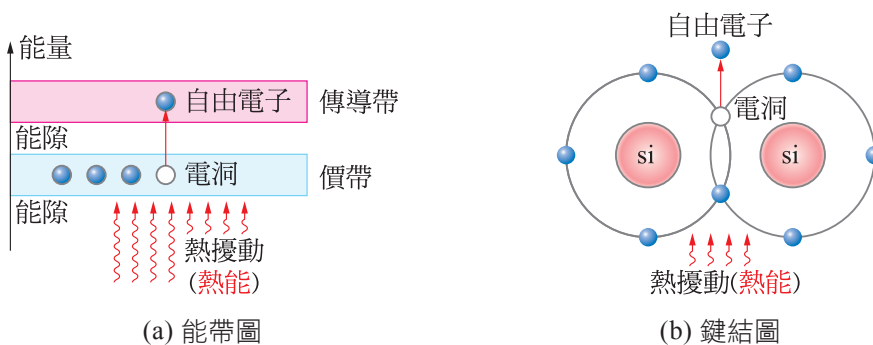


圖 3-5 矽原子接受熱能，進入傳導帶成為自由電子

當電子被熱擾動釋放出來時，價帶因失去一個電子而留下一個電洞，電子帶負電荷，電洞帶正電荷。溫度越高，被熱能釋放出來的電子數愈多，電洞也會成比例的增加，電子數增加愈多，半導體的導電性將成正比例增高。可知，半導體之導電性與溫度之升降成正比。



3-1.4 電子流與電洞流

以上所述，當純半導體接上電壓，或增加熱能時，因價帶上的電子吸收熱量提高本身的能量，當吸收之能量高於能隙時，會進入傳導帶成為傳導電子（自由電子）。傳導電子在晶體內任意移動，很容易被正電位吸引而朝正電端移動，如圖 3-6(a) 所示，形成電子流動的形式，稱為電子流（electron current）。

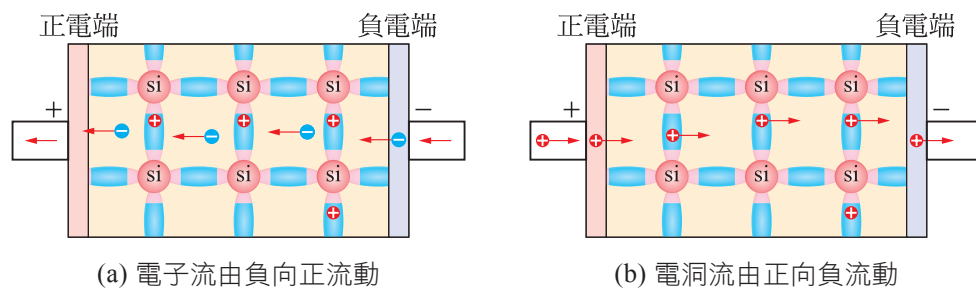


圖 3-6 電子流與電洞流

電子流指自由電子在半導體受壓或受熱擾動後，形成的一種電流形式。在矽原子內因產生自由電子形成的電洞，相對於自由電子的移動，電洞形成的電流形式，正好與電子流相反。電洞形成之電流形式，說明如下：

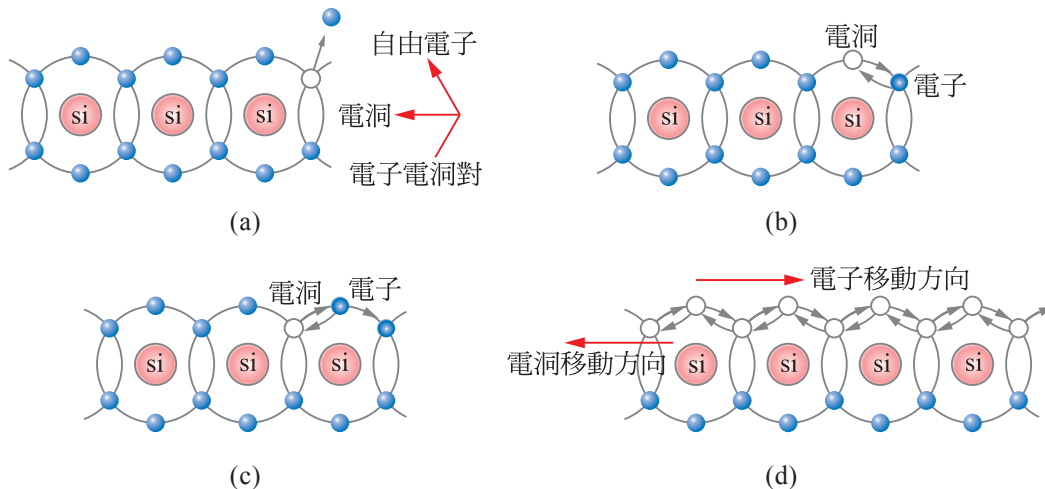


圖 3-7 電子流與電洞流

如圖 3-7(a) 所示，矽原子受到熱擾動，破壞電子電洞結合之共價鍵，成為自由電子，電子自價帶進入傳導帶成為自由電子，在價帶上留一電洞。

此電洞被受熱擾動之價電子佔用，形成共價鍵結合，而移走之價電子，在該處留下另一電洞，如圖 3-7(b) 所示。第二處留下之電洞，又會被另一價電子佔用，留下第三處電洞，如圖 3-7(c) 所示。價電子不斷自電洞處移動，移動後於該處又留下電洞，如此循環下去，如圖 3-7(d) 所示，電子移動的方向，與留下電洞移動的方向相反，而電子移動形成電流的形式，稱為電子流；電洞移動的電流形式，稱為電洞流（hole current），如前述圖 3-6(b) 所示。

3-1.5 溫度特性

半導體受限於能隙，平常都在能帶上移動，呈穩定狀態。但在高溫或光照等狀態下，價電子將吸收熱能提高自身的能量，此能量大於能隙時，價電子會進入傳導帶成為自由電子，如此循環下去，會增加自由電子的數量，而改變半導體之導電性，相對地改變了半導體之電阻值，成為良導體。電子工業就是利用半導體這種可隨環境改變其導電能力的特性，發展出多項的應用產品。

1 溫度上升，電阻下降的效應

半導體接受光照或熱的能量時，半導體之電阻率 ρ 會變動，物質的電阻率與材質有關，與其長度或體積沒有關聯。因此，電阻率是材料既有的特性，只是電阻率的變動與物質受熱有關；溫度上升時，金屬物質之電阻率隨之上升，半導體則隨之下降。電阻率與物質之電阻值成正比，電阻值在供應電壓保持定值時，與流經物質之電流成反比，即電阻率下降電流量會增加，因而提升半導體之導電率。

半導體之電阻率對溫度的關係與金屬導體不同，這是因為半導體中能夠活動的價電子數與溫度有關，溫度愈高，半導體中能夠跨越能隙到達傳導帶的價電子數就會增多，自由電子數量增多，形成電流的流量會增大，電流量增大電阻值就會減小。溫度升高，電阻下降是半導體的特色。



2 光伏特效應

光伏特效應 (photovoltaic effect) 指半導體在受到光照時會產生輸出電壓的現象。應用光伏特效應可製作光電池、光敏二極體等元件。一般半導體之能隙約為 $1 \sim 2 \text{ eV}$ (電子伏特)，可吸引紅外線或可見光，以光 - 電轉換之效率來看，其效應遠大於金屬。除此之外，半導體具有傳導電的特性，在傳導帶有帶負電荷的電子，在價帶有帶正電荷的電洞。這種雙極性的導電，是半導體最大的特色。光伏特效應說明如下：

光照到半導體表面時，半導體吸收光子產生熱擾動形成電子 - 電洞對，電子與電洞因濃度增加向半導體四面擴散，又因電子和電洞的擴散係數不同，在半導體內電子與電洞的分佈就不相等。因此，分佈不均的電子與電洞間形成了內建電場，內建電場的效應，即為實驗所量測到的電壓，此電壓值一般而言非常小。

3 光電導 (photoconductive) 效應

在半導體內，當價電子獲得外界供應之能量時，如光照射等，會跳到較高層的傳導帶。此時，價電子雖處在傳導帶的能階，狀況仍不穩定，隨時會將獲得的能量釋放，再回到價帶。若價電子獲得足夠的能量，就會擺脫原子核的束縛成為自由電子，自由電子空出來的位置稱為電洞。自由電子有可能因摩擦或碰撞等因素損失能量，最後受到電洞的吸引再次復合。如矽原子最外層的電子，若要成為自由電子需要吸收 1.1 eV 的能量。當矽原子最外層的電子，吸收到光照射的能量超過 1.1 eV 時，會成為自由電子並產生電洞，此現象稱為光生電子 - 電洞對 (light-generated electron-hole pairs)。電子 - 電洞對的數目越多，矽原子的導電性越好。矽晶體因光照射使得導電效果變好的現象，稱為光導效應。

例題 3-4

產生一個自由電子，就會多出一個電洞，稱此現象為何？

解 電子與電洞成雙產生，稱為電子 - 電洞對。

例題 3-5

簡述電子流與電洞流之流動方向相反。

解 價帶上移走一個電子，就會在原地留一個電洞。若電子自左方原子佔用這個空位，左方會留下一個空位，兩者流動的方向，電子係往右方移動，電洞則自左方移動，兩者相反。

類題演練 3-1

3. 價帶上之電洞，隨時可接納一個電子，電子為負電荷，電洞之帶電性為何？



3-1 隨堂練習

- () 1. 下列何者為能量單位？
(A) 伏特 (V) (B) 安培 (A) (C) 瓦特 (W) (D) 電子伏特 (eV)。
- () 2. 已知某物質之能隙 (E_g) 為 5 電子伏特，則該物質是
(A) 超導體 (B) 導體 (C) 半導體 (D) 絕緣體。
- () 3. 電子流與電洞流之流動方向
(A) 相反 (B) 相同 (C) 先相同再相反 (D) 視情況而定。
- () 4. 增加半導體之自由電子數，可以
(A) 加熱 (B) 加電壓 (C) 光照 (D) 以上皆可。
- () 5. 半導體若形成電子電洞對，其狀態趨於
(A) 電子數增多 (B) 電洞數增多 (C) 穩定 (D) 不穩定。
- () 6. 溫度上升，半導體之導電性會
(A) 減低 (B) 增高 (C) 先增後減 (D) 先減後增。



3-2 P 型半導體

純半導體的導電性不佳，主要在傳導帶之電子與價帶之電洞的數量不足以形成電流。因此，純半導體必須摻入雜質，以增加自由電子和電洞之數量，才能改變純半導體之導電性。

3-2.1 本質半導體

主要的半導體材料，如矽（IV 價）、鍺（IV 價）、砷化鎵（III-V 價）等。砷化鎵是目前最熱門的半導體材料，主要的產品為高功率電晶體、光二極體等。砷化鎵的優點為：

1. 電子移動速率為矽的 5.7 倍，適用作高頻元件。
2. 功率消耗低。
3. 抗輻射性佳。

但，製作砷化鎵的技術，成熟度尚不及矽和鍺，因此，一般性產品的材料仍以矽和鍺為主。

在原子結構中，不摻雜任何物質的半導體材料，稱為純半導體，或稱本質半導體（intrinsic semiconductor），特性如下：

1. 在純半導體中，價電子都在價帶上移動，特性如同絕緣體。
2. 在本質半導體中，破壞一個共價鍵，會產生一個自由電子和一個電洞，形成電子電洞對，所以電子濃度（或數量）等於電洞濃度。
3. 本質半導體受熱擾動，電子電洞成雙出現，形成之電子流與電洞流，大小相同但方向相反。
4. 本質半導體受熱擾動，雖電子電洞成雙出現，但也有部分的電子電洞對經由共價結合而消失，造成本質半導體的載子濃度過低，導電性較差。
5. 電子電洞成雙出現，形成電子數等於電洞數，所以本質半導體屬於電中性。
6. 本質半導體不適合製成電子元件，須摻入雜質提高導電能力，才成為好的電子材料。

例題 3-6

本質半導體之電性為何？

■解 不帶電，是電中性。

例題 3-7

要增加本質半導體之導電性，應如何處理？

■解 半導體內摻入雜質，改變外層電子軌道之電子數，提升其導電性。

類題演練 3-2

1. 本質半導體受熱擾動，導電性仍較差，簡述其原因。

3-2.2 外質半導體

依本質半導體之特性，為了改善本質半導體的導電性，可加入雜質改變半導體之特性，增加電子流或電洞流，以提昇半導體之導電性。本質半導體摻入雜質的過程，稱為摻雜（doping）。摻入雜質之半導體，稱為外質（或雜質）半導體（extrinsic semiconductor）。外質半導體以摻入不同之雜質，決定外質半導體的特性。

外質半導體因摻入不同的雜質，原子周圍可能會多出一個電子或一個電洞，改變本質半導體之導電性；如果摻入過高濃度之雜質，外質半導體有可能出現如同金屬導體般的導電性，成為一個良導體。也可能如同兩片極板間之際間電容效應，在本質半導體內摻雜不同極性之雜質，在半導體之接觸面，會形成一個內建電場（built-in electric field）。值得注意的是，內建電場會影響半導體元件的操作。

外質半導體將完全改變本質半導體之導電性，及內建電場改變能階狀態等，進而改變本質半導體之特性，使外質半導體適合作為電路之元件，如二極體、電晶體等。



電晶體屬於主動式半導體元件（active semiconductor devices），主動元件若與被動元件，如電阻器、電容器等可組合成各式各樣的電子電路或積體電路等，以生產各種的資訊產品，如微處理器等。如圖 3-8 所示為外質半導體之分類。

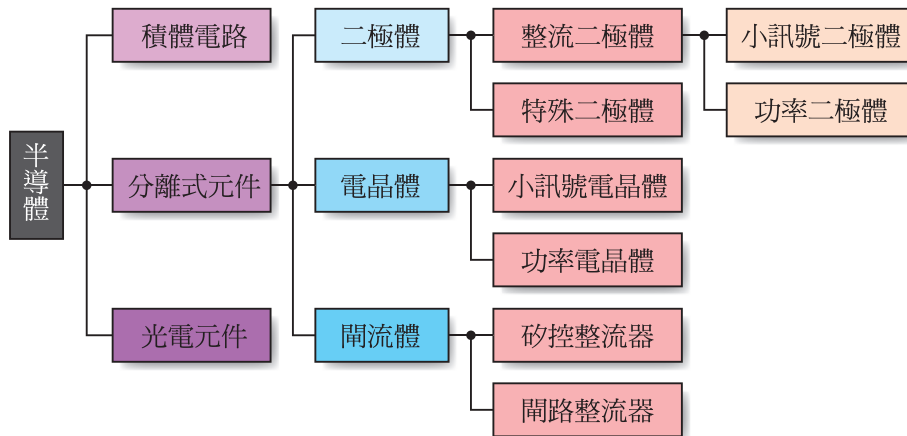


圖 3-8 半導體元件之分類（來源：工研院）

圖中，整流二極體主要作用在整流與抑制異常訊號。整流是將交流電轉換成直流電。抑制異常訊號是去除超出限定輸入訊號範圍的部分，以維持輸入訊號之穩定，目的在保護電路，如通訊、消費性電子等電路。在半導體產業中，二極體被歸納於分離式元件；分離式元件可分為二極體、電晶體及閘流體等三大類。閘流體應用於開關電路，發光二極體則屬於光電元件。

註 外質半導體是在一億個本質半導體裡摻雜一個雜質，比例為 $10^8 : 1 =$ 本質：雜質。

3-2.3 多數載子和少數載子

在矽晶體內加入三價的雜質原子，可增加半導體之電洞數量。具有三價電子的雜質原子有，硼（B）、鎵（Ga）、銦（In）等。

如圖 3-9(a)(b) 所示為矽晶體內摻入三價硼原子產生電洞的示意圖。依八隅體規則，當矽晶體內摻入三價硼原子時，矽原子會提供價電子與硼原子結合。每一矽原子提供一價電子共有四個矽原子與三價硼原子結合，圖示，就會產生一個電洞。結合後的外質半導體，因所有材料之質子數和電子數相等，所以不會有淨電荷存在，因此是電中性（不帶電）。

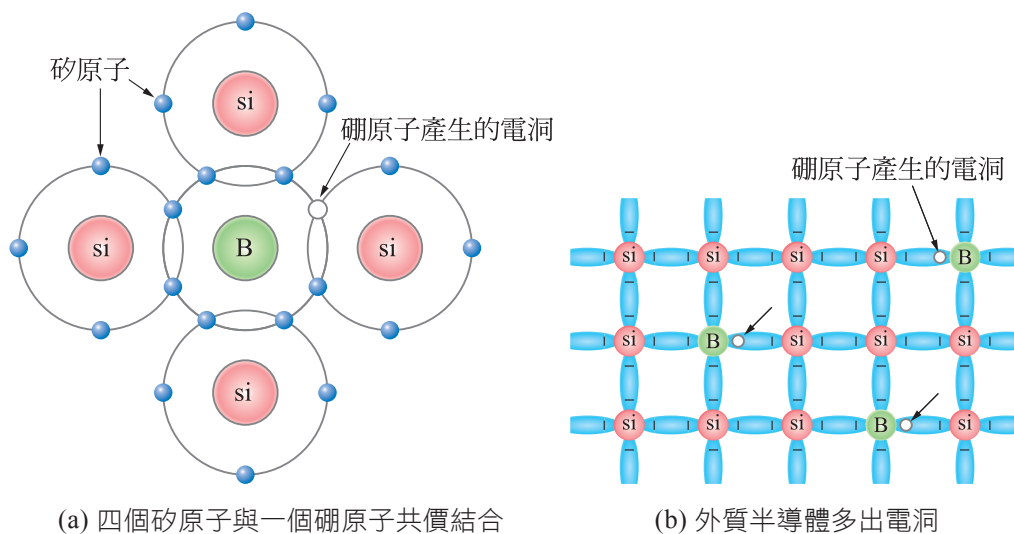


圖 3-9 矽晶體摻入三價硼，晶體多出電洞

結合後之外質半導體，電洞成為多數，電洞帶正電荷，故稱此半導體為 P 型半導體 (P-type semiconductor)。P 型半導體內，電洞之數量較多，稱為多數載子 (majority carriers)。P 型半導體內仍有自由電子移動，只是數量較少，稱為少數載子 (minority carriers)。P 型半導體內產生之自由電子，是熱擾動破壞電子電洞對而產生，不是矽晶體摻入三價硼原子而產生。

例題 3-8

本質半導體摻入雜質成為何種物質？導電性如何？

解 外質半導體，如 P 型半導體等。導電性較本質半導體良好。

例題 3-9

比較 P 型半導體之多數載子與少數載子。

解 P 型半導體之 "P"，原文為 "positive"，意為 "正的"，本質半導體摻入三價雜質後，電洞數較電子數多，電洞稱為 P 型半導體之多數載子，電子則為少數載子。

類題演練 3-2

2. 簡述 P 型半導體之導電性。



3-2.4 受體與帶電性

半導體被廣泛地應用在資訊產品中，主要是在晶體中可摻入雜質改變其導電性。摻雜過的半導體稱為外質半導體，如四價矽原子摻入三價硼原子成為 P 型半導體。P 型半導體即是外質半導體。決定外質半導體之導電性是摻入雜質的濃度，同時也決定了外質半導體的極性。

適合作為半導體之摻雜物 (dopant)，端視兩者的原子特性而定。一般而言，摻雜物依外質半導體的極性，可分為施體 (donor) 與受體 (acceptor)。如圖 3-9(a) 所示，摻入矽晶體之三價硼原子，會與四價矽原子形成共價鍵結合。在結合過程中，硼原子之價電子數目比矽原子少一個，結合結果會帶來一個空位，這個多出的空位稱為電洞，電洞可以再接受一個自由電子形成電子電洞對，故稱硼原子為受體原子 (acceptor atom)。受體原子摻雜後的外質半導體稱為 P 型半導體，P 代表電洞帶正電荷。

外質半導體因摻雜物的不同，將改變能帶間的能隙，使受體原子在近價帶的地方產生新的能階。以摻雜硼原子進入矽為例，因為硼的能階到矽的價帶之間僅有 0.045 電子伏特，遠小於矽本身的能隙 1.12 電子伏特，能隙的能量變小，所以，在室溫下的熱能，就可以破壞外質半導體之共價鍵，分裂出自由電子，提昇半導體之導電性。

P 型半導體的特性：(1) 必須由本質半導體摻入 3 價電子的原子所產生，(2) 結合晶體內之電洞為多數載子，電子為少數載子，(3) 晶體之電性仍為中性體。

例題 3-10

何謂受體？在何種情況下，才會產生受體。

解 四價矽原子摻入三價硼電子，依共鍵價結合，會多出電洞。電洞在價帶上會接受原子外之自由電子，形成共價鍵結合，故稱此電洞為受體。提供三價電子之硼原子，稱為受體原子。

3-2 隨堂練習

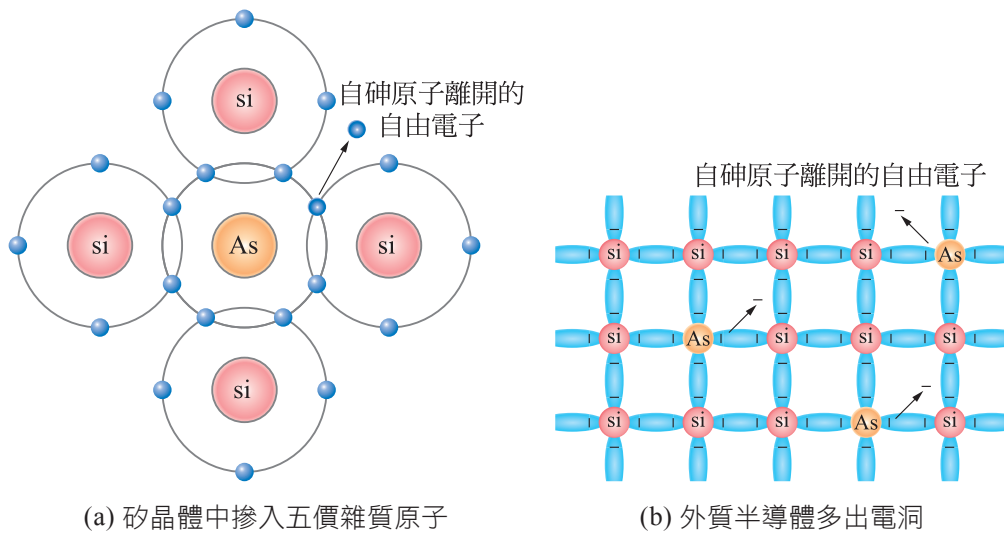
- () 1. 本質半導體為
 (A) 帶四價電子 (B) 電中性
 (C) 電子濃度與電洞相等 (D) 以上皆是。
- () 2. P 型半導體是本質半導體摻入
 (A) 二價 (B) 三價 (C) 四價 (D) 五價 電子。
- () 3. 加強本質半導體之導電性，應
 (A) 摻入雜質 (B) 增加熱擾動
 (C) 加大電壓值 (D) 提升能量。
- () 4. 本質半導體最外層軌道之價電子數為多少？
 (A) 八 (B) 六 (C) 四 (D) 二 價電子。
- () 5. P 型半導體又稱為
 (A) 本質半導體 (B) 純半導體
 (C) 外質半導體 (D) 良半導體。
- () 6. P 型半導體
 (A) 電洞為多數載子 (B) 電子為受體
 (C) 電子為多數載子 (D) 電洞為施體。
- () 7. 摻入雜質之半導體，可再接受電子組成電子電洞對，稱此雜質為
 (A) 施體 (B) 受體 (C) 施體原子 (D) 受體原子。
- () 8. P 型半導體之特性
 (A) 帶正電荷 (B) 接受電子 (C) 電中性 (D) 以上皆是。



3-3 N 型半導體

在矽晶體內加入五價的雜質原子。具有五價電子的雜質原子有：砷（As）、磷（P）、鉍（Bi）、銻（Sb）等。

如圖 3-10(a)(b) 所示為矽晶內摻入五價砷原子產生自由電子的示意圖。依共價鍵結合，當矽晶體內摻入五價砷原子時，矽原子會提供價電子與砷原子結合。每一矽原子提供一價電子共有四個矽原子與五價砷結合，砷原子提供四價電子就會多出一個電子，多出的電子成為傳導電子在晶體內移動。因此，藉著矽晶體與五價砷原子的摻雜，就能控制傳導電子的數量。傳導電子是共價鍵結合多出的電子，不會在價能帶上產生電洞。在矽晶體與砷原子摻雜後組成之外質半導體，因傳導電子帶負電荷，故稱此半導體為 N 型半導體（N-type semiconductor）。



↑ 圖 3-10 矽晶體摻入五價砷，晶體多出電洞

3-3.1 多數載子和少數載子

矽原子與五價砷原子共價鍵結合後自由電子成為多數，自由電子帶負電荷，故稱此半導體為N型半導體（N表示負電荷）。在N型半導體內自由電子之數量較多，稱為多數載子（majority carriers）。N型半導體內仍有電洞移動，只是數量較少，故稱半導體內之電洞為少數載子（minority carriers）。N型半導體內產生之電洞，是熱擾動破壞電子電洞而產生，不是矽晶體摻入五價砷原子而產生。

3-3.2 施體與帶電性

砷原子提供四價電子與矽原子共價鍵結合，多出的電子帶負電荷，改變矽晶體原來的電性。多出的電子是摻雜的砷原子提供，故稱此電子為施體電子。提供施體電子之砷原子稱為施體原子（donor atom）。比較施體電子和本質半導體的價電子，施體電子進入傳導帶所需的能量較低；施體電子進入傳導帶不會在價帶留下電洞；施體電子比較容易在外質半導體的晶體中移動，產生電流。

施體原子在失去了電子後只會固定在外質半導體的晶體內。這種摻雜後獲得多餘電子的作用，只在提升晶體之導電性，因晶體內之質子數和電子數相等，所以不會有多餘電荷存在，因此仍是電中性。

N型半導體的特性：

1. 必須由本質半導體摻入5價電子的原子所產生。
2. 結合晶體內之電子為多數載子，電洞為少數載子。
3. 晶體之電性仍為中性體。



例題 3-11

N 型半導體如何組成？帶電性為何？結合成為晶體之電性為何？

解 N 型半導體由四價矽原子摻入五價砷原子，依共鍵價結合，會多出電子，電子為負離子，所以結合而成之晶體，稱為 N 型半導體；N 型半導體帶負電荷，但結合後，晶體內之電子數與質子數相等，正負離子數量相同，淨電荷數為零，故 N 型半導體本身不帶電。

例題 3-12

何謂施體？在何種情況下，才會產生施體。

解 四價矽原子摻入五價砷電子，依共鍵價結合，會多出電子。電子在傳導帶上移動，隨時可提供電子與電洞進行共價鍵結合，故稱此電子為施體。提供五價電子之砷原子，稱為施體原子。



3-3 隨堂練習

- () 1. 形成 N 型半導體須摻入
(A) 五價 (B) 四價 (C) 三價 (D) 二價 雜質。
- () 2. N 型半導體
(A) 電洞為多數載子 (B) 電子為受體
(C) 電子為多數載子 (D) 電洞為施體。
- () 3. 摻入雜質之半導體，可再接受電洞組成電子電洞對，稱此雜質為
(A) 施體 (B) 受體 (C) 施體原子 (D) 受體原子。
- () 4. N 型半導體之特性
(A) 帶負電荷 (B) 接受電洞 (C) 電中性 (D) 以上皆是。

3-4 二極體製造

二極體 (diode)，顧名思義，具有正、負兩個電極，是電子系統中最基本的元件。二極體的作用類似一般二路開關：打開 (ON) 可導通電路；關閉 (OFF) 則切斷電路。二極體的特性，單方向導通電流，具有整流作用，可將交流電轉換成直流電。在應用上，發光二極體 (LED) 被廣泛使用在消費與商用產品上。在結構上，基本之組成，是 P 型半導體與 N 型半導體結合的 PN 接面二極體。

3-4.1 二極體之組成

將 P 型半導體與 N 型半導體接合在一起，如圖 3-11(a)(b) 所示。兩半導體之接合處稱為 PN 接面，這種由不同極性 (正、負極) 之半導體接合而成之二極體稱半導體二極體，或稱 PN 接面二極體。

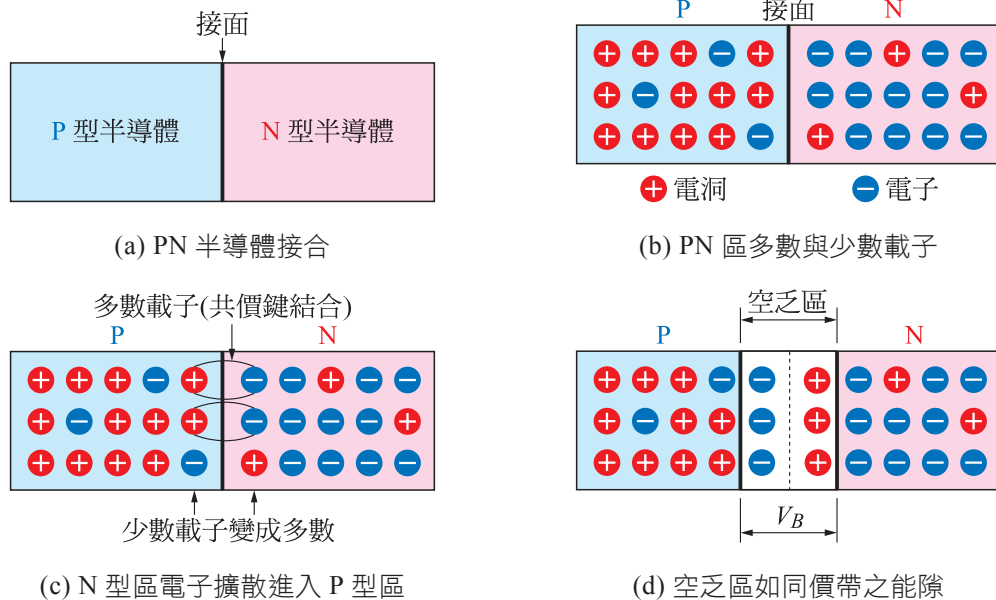


圖 3-11 PN 接面二極體之形成



如圖 3-11(c) 所示，當 P 型與 N 型半導體接合之瞬間，在 N 型半導體之傳導電子會往界面擴散，進入 P 型半導體，並與界面附近的電洞形成共價鍵結合。每當傳導電子跨過界面與電洞共價鍵結合時，在界面側 N 型半導體的電子數目就會減少，逐漸顯示電洞的特性，正離子會變成多數載子；界面側 P 型半導體的電洞數目會逐漸減少，呈現電子的特性，負離子數會變成多數載子。因此，在界面附近會逐漸形成離子層。離子層的特性為：P 型區內之負離子變成多數載子而帶負電，N 型區之正離子變成多數載子而帶正電，稱此離子層為空乏區 (the depletion layer)。如圖 3-11(d) 所示。在 P 型半導體之空乏區帶負電荷；在 N 型之空乏區帶正電荷。

N 型區之電子若要跨過空乏區之斥力進入 P 型區，所需的能量稱為障壁電勢。在室溫中，矽的障壁電勢約為 0.7 伏特，鍺的障壁電勢約為 0.3 伏特。當溫度增加時，因半導體內傳導電子數目的增加，障壁電勢會隨之降低；溫度降低時，障壁電勢會增加。障壁電勢是決定界面二極體是否導通的重要因素。

例題 3-13

簡述空乏區之建立及空乏區內離子之屬性。

解 空乏區是 P 型與 N 型半導體接合後，自然形成之離子層。空乏區佔用 P 型與 N 型之側邊。在空乏區之 P 型側，負離子為多數載子，帶負電；N 型側之正離子為多數載子，帶正電。

例題 3-14

簡述二極體在電路上之作用？

解 PN 界面二極體接上順向偏壓時，N 型區之傳導電子獲得充足之能量，會擴散至空乏區與正離子形成共價鍵結合，再進入 P 型區與電洞形成共價鍵結合，產生電子流，二極體內會形成電流流動之形式，導通二極體。二極體接逆向偏壓時，N 型區之傳導電子因異性電荷相吸之作用，向正端移動，擴大空乏區的範圍，截止電子流的產生，阻斷二極體內電流的流動，二極體變成斷路的情形。二極體在電路上之作用有如二路（通與斷）開關。

類題演練 3-4

1. 空乏區之障壁電勢，在矽與鍺晶體各為多少伏特？
2. 若加大 PN 接面二極體之空乏區，其作用如何？

3-4.2 二極體之製造

半導體之導電性介於導體和絕緣體間。半導體之導電性可藉由摻入適當的雜質而改變。如矽晶體摻入三價硼原子轉變為 P 型半導體；摻入五價砷原子轉變為 N 型半導體。

半導體之材料包含：兩種基本元素矽（Si）和鍺（Ge），及數十種化合物，例如砷化鎵（GaAs）和磷化鎵（GaP）等。矽與鍺是常用的基本元素，兩者之比較如下：

1. 鍺的缺點：

- (1) 鍺的熔點為 937°C ，無法進行高溫製程。
- (2) 無法自然形成氧化物，致使其產品的表面易出現漏電現象。

2. 矽的優點：

- (1) 矽的熔點為 1415°C ，允許進行高溫製程。
- (2) 矽易形成二氧化矽的絕緣體，可做為絕緣及保護之用。
- (3) 平坦化製程技術的成功，矽成為重要的晶片基材，約佔晶圓原料的 90% 以上。

1 製作二極體

晶圓之製作，步驟較繁複。現以製好之 P 型半導體作為基座，再說明如何摻入 N 型半導體，完成二極體之製作、接線、封裝等，說明如下：

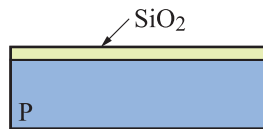


1. 製作二極體之流程及重點說明：

(1) 洗淨 P 型基座：去除晶圓上之雜質。

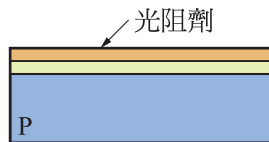


(2) 高溫氧化：產生矽氧化層。用 900°C 的高溫蒸汽，讓氧與矽晶片進行熱氧化，使晶圓表面形成矽氧化層 (SiO₂)。矽氧化層作為元件間之電性間隔。



(3) 微影製程

① 塗光阻劑：產生耐蝕刻薄膜。

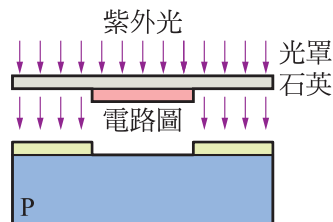


說明：光阻劑是耐蝕刻薄膜。步驟為：

- (a) 將晶圓置放在真空吸附的旋轉塗佈機上，
- (b) 在晶圓中心處滴入 2 至 3 cc 的光阻，
- (c) 將晶圓快速旋轉至固定的轉速約 30 秒，
- (d) 厚度與光阻的黏滯性有關。

② 軟烤：去除光阻中的溶劑，同時加強光阻對晶圓的附著力。
軟烤的溫度，一般在 90 至 120 度間，時間在 60 至 120 秒間。

③ 曝光：將電路圖拷貝至光阻層。



說明：在石英基板上以鉻金屬作為遮光罩 (mask)，再以紫外線照射，鉻金屬上之電路圖，會拷貝在基座之光阻劑上。

④ 顯影：使用顯影液將光罩拷貝至基座之圖形顯現出來。

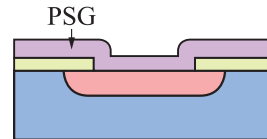
⑤ 硬烤：完成顯影，為了增加光阻對基板的附著力，需要再將基座烘烤 100 度至 180 度，同時，蒸發光阻內殘留的溶劑，降低光阻內溶劑的含量。

⑥ 去光阻劑：採用正光阻劑，遮蔽光線的部分會留下來。

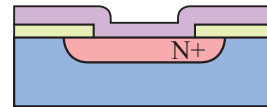


說明：光阻劑以 100°C 燒至定型後，以碳氟化物等物質作的電漿 (plasma gas) 進行乾式蝕刻 (dry etching)，用氧氣電漿進行清洗處理去除光阻劑，稱光阻剝離。

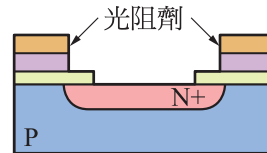
(4) 塗佈 PSG (Phosphate silicate glass, 磷矽酸玻璃)：形成兩層間之空氣間隙。



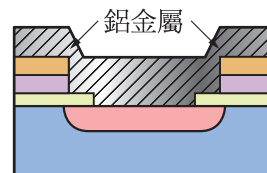
(5) 高溫擴散：在基板上植入離子形成導電層。



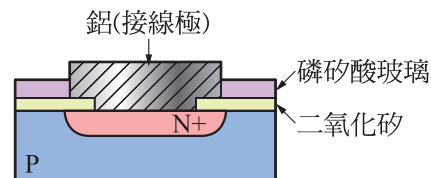
(6) 第二道微影製程：重複第 (3) 項步驟，露出基板表面，準備作接線極。



(7) 鋁金屬蒸鍍：作為接線極。



(8) 去除多餘之鋁金屬、光阻劑：留下作為接線極之金屬層。





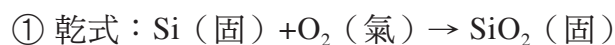
2. 補充說明二極體製程之作法及重點解釋：

(1) 洗淨 P 型基座：

清洗基座上之污染源，污染源包括油脂及雜質等。清洗的過程主要是在酸性等水溶液中，溶解、去除雜物後，再用純水沖洗，此過程稱過水，使水分乾燥。

(2) 高溫氧化：

高溫氧化製程在產生矽氧化層（ SiO_2 ）作為元件間的電性隔離，基本上熱氧化分為乾式（dry oxidation）及濕式（wet oxidation）。乾式是維持 P 型基座在高溫（ $800 \sim 1100^\circ\text{C}$ ）的環境下，通入氧氣以氧化基座並在座上產生矽氧化層；濕式是以水蒸氣氧化。乾式雖然氧化速度較慢，但可獲得較好之薄膜。濕式以水蒸氣氧化基座，氧化的速度較快，膜質較差。矽氧化方程式分別為：



P 型基座氧化後會在表面形成一層透明的氧化矽（ SiO_2 ）層。

(3) 微影技術：

微影是利用光罩上面的幾何形狀，將圖案覆蓋在半導體晶圓上之感光薄膜。微影製程形成的光阻圖形，不是電路元件的最終部分，只是電路圖形的模型。在積體電路製造中，極大多數的微影設備是利用紫外光的光學儀器。

微影的製程，是利用微影曝光機來完成。曝光機的性能，由下列參數決定：

① 解析度：以高忠實度，轉移到晶圓表面的光阻膜上之最小特徵尺寸。

② 對正誤差：量測後光罩能多精確對準於先前晶圓上所定義之圖案。

③ 產出：對一給定的光罩層，每小時能曝光的晶圓數目。

微影的製程，如圖 3-12 所示。

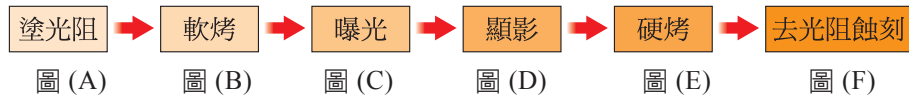


圖 3-12 微影的製程

〔說明〕

圖 (A) 塗光阻：

光阻主要由樹脂、感光劑、溶劑等三種成分組成。光阻是對光線敏感的化合物。光阻可分為正光阻與負光阻，兩者之差別為：

- (a) 正光阻：曝光區域的光阻將較容易溶解於顯影劑。
- (b) 負光阻：曝光區域的光阻將較難溶解於顯影劑。

光阻於曝光前不會溶解於顯影劑，曝光後感光層因吸收輻射能，改變原本的化學結構，變成較易溶解於顯影劑。

塗光阻的步驟為：

- Step 1** 將晶圓置放在真空吸附的旋轉塗佈機上，
- Step 2** 在晶圓中心處滴入 2 ~ 3 cc 的光阻，
- Step 3** 將晶圓快速旋轉至固定的轉速約 30 秒，
- Step 4** 旋轉後殘留於晶圓上的光阻，其厚度與光阻的黏滯性有關。

圖 (C) 曝光：

曝光是利用光學微影系統將光罩上的圖案，以紫外光拷貝至晶圓之光阻上。紫外光通常採用汞弧燈管所產生的紫外光。

在曝光的製程中，光罩是透明的玻璃材料所製成，目的使拷貝在晶圓上的圖案與光罩上的圖案一樣。曝光的種類有接觸式、近接式及投影式等三種。接觸式曝光機之光罩與晶圓是緊貼，尺寸比例為 1：1，解析度也較好，故常採用。



圖 (F) 去光阻蝕刻：

硬烤後，接著把不需要的部分光阻去掉，或是把表層的光阻去除，去光阻一般有兩種方法：濕式去光阻和乾式去光阻。濕式去光阻，是利用有機溶液對光阻進行結構性的破壞，使光阻溶於溶液裡。代表性的溶劑有丙酮和芳香族等有機溶液。（註：丙酮有毒性，會引起肝硬化，使用時應多加注意）。另一種為無機溶液去光阻法。光阻本身為有機物，主要由碳、氫等元素化合而成，使用硫酸、雙氧水等無機溶液溶解光阻，雙氧水可將光阻內的碳化合成二氧化碳，氫則用硫酸去水。

(4) 高溫擴散及離子佈植：

高溫擴散（diffusion）把雜質原子擴散到矽基板內。如要產生 N 型半導體，可在高溫爐內通以砷（As）的氣體，使這些雜質原子擴散入選定的基座表面區域。離子佈植（ion implantation）將摻雜的雜質，利用佈植機台打入矽晶圓的深度位置。

(5) 鋁金屬蒸鍍：

鋁金屬蒸鍍是沉積高純度的鋁金屬膜，以形成元件連線之金屬層。作法：鋁的熔點很低，大約是攝氏 660 度左右，所以在低壓下很容易就將鋁氣態化。在金屬薄膜製程中，用熱蒸鍍的方式沉積鋁金屬薄膜，形成金屬層作為接線極。

(6) 晶片切割：

晶片切割（Die Saw）是使用晶片切割機切下並分離製程完工晶圓上一顆顆的晶粒（die）。自晶片切下的晶粒，井然有序地排列在膠帶上，並用框架支撐，以避免皺摺膠帶或使晶粒擠成一堆。



圖 3-13 晶片切割

(7) 封裝：

① 組裝晶粒（玻封二極體）

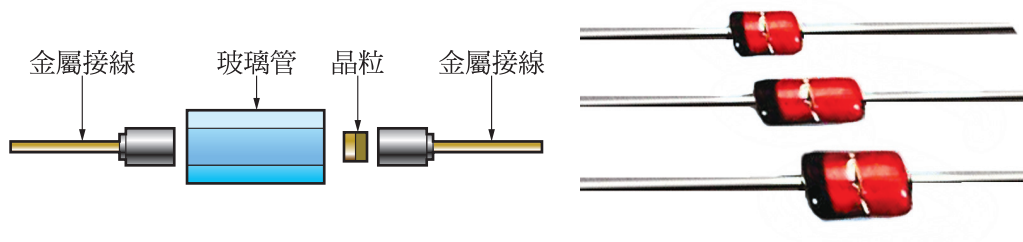


圖 3-14 組裝晶粒

② 封上玻璃漿

組裝完成後，封上玻璃漿，作為 PN 接面之保護層。

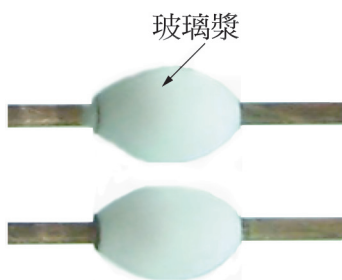


圖 3-15 封上玻璃漿

③ 高溫燒結

經高溫燒烤，凝固玻璃漿，增強玻璃硬度，可保護 PN 二極體。

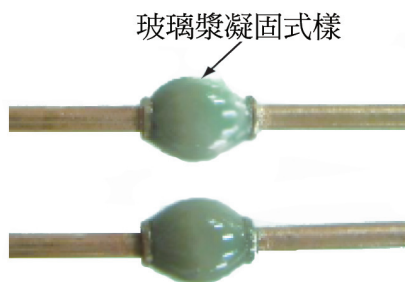


圖 3-16 高溫燒結玻璃漿



④ 封膠 (molding)

將預熱之熱固性環氧樹脂，投入注塑口，啟動油壓機固化樹脂，形成各種形狀之二極體，如圖 3-17 所示。

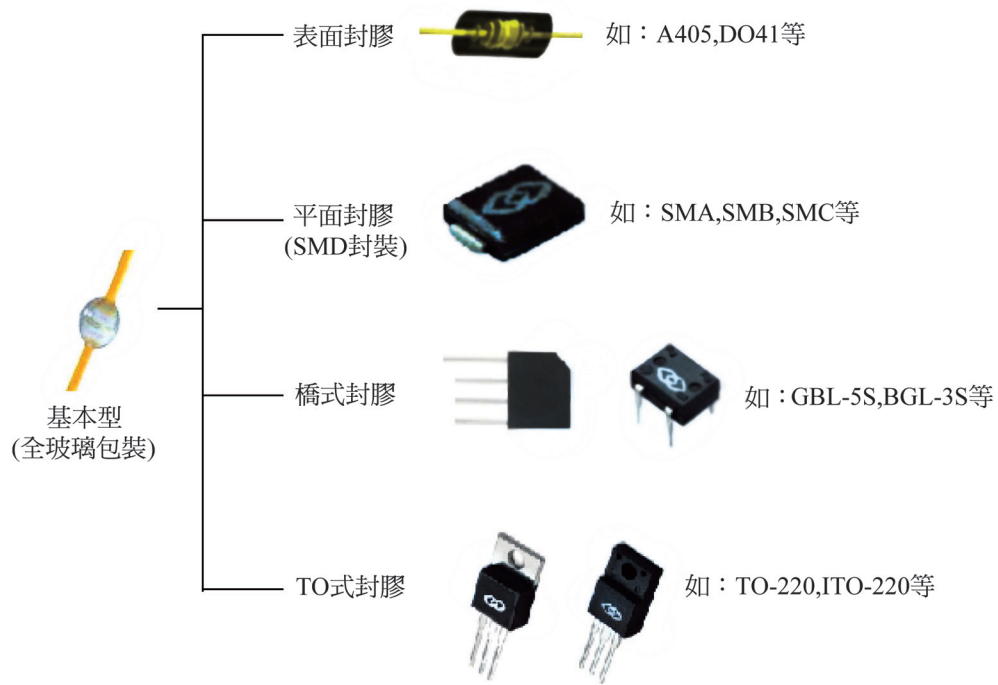


圖 3-17 封膠之形式

3-4 隨堂練習

- () 1. 二極體為
 - (A) 由 PN 接面而成
 - (B) 單向導通
 - (C) 動作如同開關
 - (D) 以上皆是。
- () 2. 空乏區又稱離子層
 - (A) 帶正電
 - (B) 帶負電
 - (C) 如同電位差
 - (D) 電中性。
- () 3. 二極體接逆向偏壓，空乏區
 - (A) 變大
 - (B) 變小
 - (C) 先大後小
 - (D) 先小後大。
- () 4. 下列何者不為矽之優點
 - (A) 熔點較鎢低
 - (B) 易氧化形成絕緣保護膜
 - (C) 晶圓的基本材料
 - (D) 以上皆是。

- 3-1
1. 依導電性，半導體介於導體與絕緣間。
 2. 純半導體材質常用的有矽和鍺。純半導體若要導電，可加入雜質，形成 P 或 N 型半導體。
 3. 單獨矽原子的電子是以能階（energy level）的形式存在。
 4. 傳導帶與價帶間分隔的距離，稱為能隙，能隙的單位是電子伏特（eV）。
 5. 相鄰的矽原子，各以四個價電子相互共用，形成共價鍵結合。
 6. 價電子指在原子內最外層軌道上的電子。
 7. 由價帶進入傳導帶之電子，會在價帶留下電洞。
 8. $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19}$ 焦耳，電子伏特為能量單位。
 9. 溫度升高，半導體之導電性會升高，金屬導體則會下降。
- 3-2
10. 摻入雜質之晶體，稱為外質（或雜質）半導體，如 P 型半導體。
 11. 在矽晶體內可加入三價的雜質原子形成 P 型半導體。
 12. P 型半導體內電洞是多數載子，電子是少數載子。電洞帶正電荷。
 13. P 型半導體內因電子數等於質子數，淨電荷為零，故本身不帶電是電中性。
 14. P 型半導體之摻雜物可再接受電子稱為受體，三價硼原子稱為受體原子。
- 3-3
15. 摻入雜質之晶體，稱為外質（或雜質）半導體，如 N 型半導體。
 16. 在矽晶體內可加入五價的雜質原子形成 N 型半導體。

17. N型半導體內電子是多數載子，電洞是少數載子。電子帶負電荷。
18. N型半導體內因電子數等於質子數，淨電荷為零，故本身不帶電是電中性。
19. N型半導體之摻雜物可再提供電子稱為施體，五價砷原子稱為施體原子。
- 3-4 20. 二極體一般指PN接面二極體，又稱整流二極體，簡稱二極體。
21. 二極體之動作如同二路開關，只有開與關二個動作。
22. 空乏區由P與N型半導體接合、擴散、結合、離子化形成。
23. 空乏區是離子層，具有障壁電勢，在N型區之正離子為多數，在P型區之負離子為多數。

基本題型

- 3-1 () 1. 能隙的單位是電子伏特 (eV)，電子伏特是
(A) 電壓 (B) 瓦特 (C) 能量 (D) 電阻 的單位。
- () 2. 1 電子伏特特等於
(A) 1.6×10^{19} (B) 1.6×10^{-19}
(C) 1.6×10^{18} (D) 1.6×10^{-18} 焦耳。
- () 3. 一原子最外層軌道有四價電子屬於
(A) 超導體 (B) 導體 (C) 絕緣體 (D) 半導體。
- () 4. 半導體的導電性隨溫度的升高而
(A) 上升 (B) 下降
(C) 先上升再下降 (D) 先下降再上升。
- () 5. 導體的導電性隨溫度的升高而
(A) 上升 (B) 下降
(C) 先上升再下降 (D) 先下降再上升。
- () 6. 鍺元素為多少價的元素？
(A) 4 (B) 3 (C) 2 (D) 1。
- () 7. 矽、鍺半導體材料的導電性，隨溫度上升而產生何種變化？
(A) 成為絕緣體 (B) 減少 (C) 不變 (D) 增加。
- 3-2 () 8. 在 P 型半導體中，載子的狀況是
(A) 只有電洞
(B) 只有電子
(C) 有多數電子及少數電洞
(D) 有多數電洞及少數電子。
- () 9. 在本質半導體中，摻入下列何項雜質元素，即可成為 P 型半導體？
(A) 磷 (B) 硼 (C) 砷 (D) 銻。

- () 10. 在矽半導體材料中，摻入三價的雜質，請問此半導體形成何種型式？半導體內部的多數載子為何？此塊半導體之電性為何？
(A) N 型半導體；電子；電中性
(B) N 型半導體；電子；負電
(C) P 型半導體；電洞；電中性
(D) P 型半導體；電洞；正電。
- () 11. 在 P 型半導體中，導電的多數載子為何者？
(A) 電子 (B) 原子核 (C) 電洞 (D) 離子。
- 3-3 () 12. N 型半導體材料中的多數載子是
(A) 電洞 (B) 電子 (C) 原子 (D) 質子。
- () 13. N 型半導體，要在本質半導體中加入少量
(A) 二價 (B) 三價 (C) 四價 (D) 五價 元素。
- () 14. 在半導體材料中加入五價雜質的目的是
(A) 降低矽晶體的導電性 (B) 增加電洞的數目
(C) 增加自由電子的數目 (D) 產生少數電子。
- () 15. PN 接面是由下列何種原因產生
(A) 電子和電洞的重新結合
(B) 離子化
(C) P 型材料和 N 型材料結合所形成的邊界區
(D) 質子和中子的碰撞。
- () 16. PN 二極體產生障壁電壓 (Barrier Potential) 的原因，下列何者正確？
(A) P 型半導體自然產生 (B) N 型半導體自然產生
(C) 加偏壓後自然產生 (D) PN 結合時自然產生。
- () 17. 矽和鍺材質二極體之障壁電勢各約為多少伏特？
(A) 0.7, 0.7 (B) 0.7, 0.3 (C) 0.3, 0.7 (D) 0.3, 0.3。

進階題型

- 3-1 () 1. 下列關於價電子與自由電子的敘述，何者錯誤？
(A) 價電子位於原子核最外層軌道
(B) 價電子成為自由電子會釋放熱能
(C) 自由電子位於傳導帶
(D) 價電子脫離原來的軌道所留下之空缺，稱為電洞。
- 3-3 () 2. 下列何者為摻入施體 (donor) 雜質後之半導體名稱？
(A) P 型半導體 (B) N 型半導體
(C) 本質半導體 (D) 載子半導體。
- () 3. 下列敘述何者不正確？
(A) Si 及 Ge 皆是本質半導體 (Intrinsic semiconductor)
(B) 將磷 (P) 或砷 (As) 加入一本質半導體可以將此半導體變為 P 型外質半導體 (Extrinsic semiconductor)
(C) 在 P 型半導體中之多數載子 (Majority carrier) 為電洞
(D) 在摻有銻 (Sb) 的半導體中，Sb 扮演的角色是施體 (donor)。
- 3-4 () 4. 空乏區是由下列何種原因造成
(A) 離子化 (B) 擴散作用
(C) 重新結合 (D) 以上皆是。



附 錄

附錄一 習題簡答

附錄二 三角函數值對照表

附錄三 應用積分數學式求解弦波之平均值



附錄一：習題簡答

對應課本頁碼

第 1 章 電子電路基本理論

6 隨堂練習 1-1

1.(A) 2.(D) 3.(B) 4.(C) 5.(C)

6.(D)

11 隨堂練習 1-2

1.(C) 2.(A) 3.(D) 4.(B) 5.(C)

6.(B)

22 隨堂練習 1-3

1.(A) 2.(C) 3.(B) 4.(D) 5.(B)

6.(A) 7.(C) 8.(A)

28 隨堂練習 1-4

1.(A) 2.(B) 3.(B) 4.(D) 5.(C)

6.(A) 7.(B)

34 隨堂練習 1-5

1.(D) 2.(A) 3.(C) 4.(A) 5.(C)

6.(C)

6 類題演練 1-1

1. 20%。

10 類題演練 1-2

1. 5A, 2. 28V。

13 類題演練 1-3

1. 電阻保持在 6Ω。

2. 100V。

3. 2.4A。

4. 10Ω。

5. 0.3mC。

6. 120μF。

7. 96.5Ω。

25 類題演練 1-4

1. 20dB。

2. 3.01dB。

3. 16V。

4. 10A。

33 類題演練 1-5

1. 12V。

2. 8V。

3. 等效電壓 $E_{Th} = I_N \times R_N = 6 \times 3 = 18(V)$ ，
等效電阻 $R_{Th} = R_N = 3\Omega$ ；電阻值不變。

37 課後習題 基本題型

1.(A) 2.(B) 3.(D) 4.(A) 5.(C)

6.(C) 7.(A) 8.(C) 9.(B) 10.(D)

11.(A) 12.(B) 13.(B) 14.(C) 15.(C)

16.(A) 17.(D) 18.(D) 19.(D) 20.(B)

21.(C) 22.(B) 23.(D)

39 課後習題 進階題型

1.(A) 2.(C) 3.(A) 4.(C) 5.(B)

第 2 章 波形

6 隨堂練習 2-1

1.(A) 2.(B) 3.(C) 4.(B) 5.(C)

6.(A) 7.(C) 8.(A)

24 隨堂練習 2-2

1.(B) 2.(A) 3.(C) 4.(D) 5.(D)

6.(B) 7.(C) 8.(A) 9.(D) 10.(A)

11.(B) 12.(D)

31 隨堂練習 2-3

1.(B) 2.(C) 3.(B) 4.(A)

36 隨堂練習 2-4

- 1.(B) 2.(D) 3.(B) 4.(D) 5.(A)
6.(B)

6 類題演練 2-1

1. 0.2 秒。
2. 20 毫秒。

8 類題演練 2-2

1. -15V 。
2. $\frac{3\pi}{4}\text{rad}$ 。
3. 240° 。
4. $\cong 628\text{rad/s}$ 。
5. 0V 。
6. 1.59V 。
7. 63.7V 。
8. 141.4V 。
9. $3\sqrt{3}\text{V}$ 。

30 類題演練 2-3

1. 5A , 15.8A 。
2. 2.0V , 20V 。

35 類題演練 2-4

1. 2V , 33.33% 。

40 課後習題 基本題型

- 1.(D) 2.(B) 3.(D) 4.(B) 5.(B)
6.(C) 7.(B) 8.(C) 9.(B) 10.(D)
11.(B) 12.(B) 13.(B) 14.(C) 15.(D)
16.(D) 17.(A) 18.(C) 19.(D) 20.(C)
21.(A) 22.(B) 23.(C)

43 課後習題 進階題型

- 1.(D) 2.(D) 3.(A) 4.(C) 5.(D)
6.(B) 7.(C) 8.(B) 9.(C) 10.(B)
11.(B)

第 3 章 半導體

9 隨堂練習 3-1

- 1.(D) 2.(D) 3.(A) 4.(D) 5.(C)
6.(B)

15 隨堂練習 3-2

- 1.(D) 2.(B) 3.(A) 4.(C) 5.(C)
6.(A) 7.(D) 8.(D)

18 隨堂練習 3-3

- 1.(A) 2.(C) 3.(C) 4.(D)

28 隨堂練習 3-4

- 1.(D) 2.(C) 3.(A) 4.(A)

4 類題演練 3-1

1. 導體幾乎沒有能隙，故能隙幾乎等於 0 電子伏特。
2. 能隙，單位為電子伏特。
3. 正電荷。依電性作用，正電荷將吸引負電荷而結合。

11 類題演練 3-2

1. 自由電子會與電洞再結合，自由電子數量增加有限，導電性較差。
2. P 型半導體內之電子數與原子核內之質子數相等，淨電荷為零，故不帶電稱電中性。



21 類題演練 3-4

1. 矽晶體約為 0.7 伏特，鍺晶體約為 0.3 伏特。
2. 二極體接逆向偏壓，可加大空乏區阻斷電流之形成，其動作有如開關被切斷。

31 課後習題 基本題型

- 1.(C) 2.(B) 3.(D) 4.(A) 5.(B)
6.(A) 7.(D) 8.(D) 9.(B) 10.(C)
11.(C) 12.(B) 13.(D) 14.(C) 15.(C)
16.(D) 17.(B)

33 課後習題 進階題型

- 1.(B) 2.(B) 3.(B) 4.(D)

附錄二：三角函數值對照表

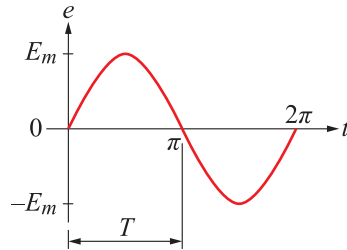
角度	sin	cos	tan	角度	sin	cos	tan	角度	sin	cos	tan
0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	31.0000	0.5150	0.8572	0.6009	62.0000	0.8829	0.4695	1.8807
1.0000	0.0175	0.9998	0.0175	32.0000	0.5299	0.8480	0.6249	63.0000	0.8910	0.4540	1.9626
2.0000	0.0349	0.9994	0.0349	33.0000	0.5446	0.8387	0.6494	64.0000	0.8988	0.4384	2.0503
3.0000	0.0523	0.9986	0.0524	34.0000	0.5592	0.8290	0.6745	65.0000	0.9063	0.4226	2.1445
.0000	0.0698	0.9976	0.0699	35.0000	0.5736	0.8192	0.7002	66.0000	0.9135	0.4067	2.2460
5.0000	0.0872	0.9962	0.0875	36.0000	0.5878	0.8090	0.7265	67.0000	0.9205	0.3907	2.3559
6.0000	0.1045	0.9945	0.1051	37.0000	0.6018	0.7986	0.7536	68.0000	0.9272	0.3746	2.4751
7.0000	0.1219	0.9925	0.1228	38.0000	0.6157	0.7880	0.7813	69.0000	0.9336	0.3584	2.6051
8.0000	0.1392	0.9903	0.1405	39.0000	0.6293	0.7771	0.8098	70.0000	0.9397	0.3420	2.7475
9.0000	0.1564	0.9877	0.1584	40.0000	0.6428	0.7660	0.8391	71.0000	0.9455	0.3256	2.9042
10.0000	0.1736	0.9848	0.1763	41.0000	0.6561	0.7547	0.8693	72.0000	0.9511	0.3090	3.0777
11.0000	0.1908	0.9816	0.1944	42.0000	0.6691	0.7431	0.9004	73.0000	0.9563	0.2924	3.2709
12.0000	0.2079	0.9781	0.2126	43.0000	0.6820	0.7314	0.9325	74.0000	0.9613	0.2756	3.4874
13.0000	0.2250	0.9744	0.2309	44.0000	0.6947	0.7193	0.9657	75.0000	0.9659	0.2588	3.7321
14.0000	0.2419	0.9703	0.2493	45.0000	0.7071	0.7071	1.0000	76.0000	0.9703	0.2419	4.0108
15.0000	0.2588	0.9659	0.2679	46.0000	0.7193	0.6947	1.0355	77.0000	0.9744	0.2250	4.3315
16.0000	0.2756	0.9613	0.2867	47.0000	0.7314	0.6820	1.0724	78.0000	0.9781	0.2079	4.7046
17.0000	0.2924	0.9563	0.3057	48.0000	0.7431	0.6691	1.1106	79.0000	0.9816	0.1908	5.1446
18.0000	0.3090	0.9511	0.3249	49.0000	0.7547	0.6561	1.1504	80.0000	0.9848	0.1736	5.6713
19.0000	0.3256	0.9455	0.3443	50.0000	0.7660	0.6428	1.1918	81.0000	0.9877	0.1564	6.3138
20.0000	0.3420	0.9397	0.3640	51.0000	0.7771	0.6293	1.2349	82.0000	0.9903	0.1392	7.1154
21.0000	0.3584	0.9336	0.3839	52.0000	0.7880	0.6157	1.2799	83.0000	0.9925	0.1219	8.1443
22.0000	0.3746	0.9272	0.4040	53.0000	0.7986	0.6018	1.3270	84.0000	0.9945	0.1045	9.5144
23.0000	0.3907	0.9205	0.4245	54.0000	0.8090	0.5878	1.3764	85.0000	0.9962	0.0872	11.4301
24.0000	0.4067	0.9135	0.4452	55.0000	0.8192	0.5736	1.4281	86.0000	0.9976	0.0698	14.3007
25.0000	0.4226	0.9063	0.4663	56.0000	0.8290	0.5592	1.4826	87.0000	0.9986	0.0523	19.0811
26.0000	0.4384	0.8988	0.4877	57.0000	0.8387	0.5446	1.5399	88.0000	0.9994	0.0349	28.6363
27.0000	0.4540	0.8910	0.5095	58.0000	0.8480	0.5299	1.6003	89.0000	0.9998	0.0175	57.2900
28.0000	0.4695	0.8829	0.5317	59.0000	0.8572	0.5150	1.6643	90.0000	1.0000	0.0000	無限大
29.0000	0.4848	0.8746	0.5543	60.0000	0.8660	0.5000	1.7321				
30.0000	0.5000	0.8660	0.5774	61.0000	0.8746	0.4848	1.8040				



附錄三：應用積分數學式求解弦波之平均值

曲線若為正弦波，如下圖 (1) 所示。設正負峰值分別為 E_m 與 $-E_m$ ，及正半週正弦波的面積為 A ，依積分數學式求解半週波形之面積為：

$$A = \int_0^{\pi} E_m \sin \theta d\theta$$



↑ 圖 (1) 求解平均值之波形圖

式中， \int 為積分的符號，0 與 π 表示積分之範圍， E_m 為正弦波之最大值， $E_m \sin \theta$ 為被積分之函數， $d\theta$ 表示對 θ 值來積分， θ 為徑度量 (rad)。積分後的結果為：

$$A = E_m [-\cos \theta]_0^{\pi} = -E_m (\cos \pi - \cos 0^\circ)$$

$$A = -E_m [-1 - (+1)] = 2E_m$$

單獨對弦波正半週積分的結果，正半週之面積為弦波最大值的 2 倍，週期為 π ，設弦波之平均值為 E_{av} ，則：

$$E_{av} = \frac{A}{T} = \frac{2E_m}{\pi} = \frac{2}{\pi} \times E_m = 0.637E_m$$

筆記欄

筆記欄