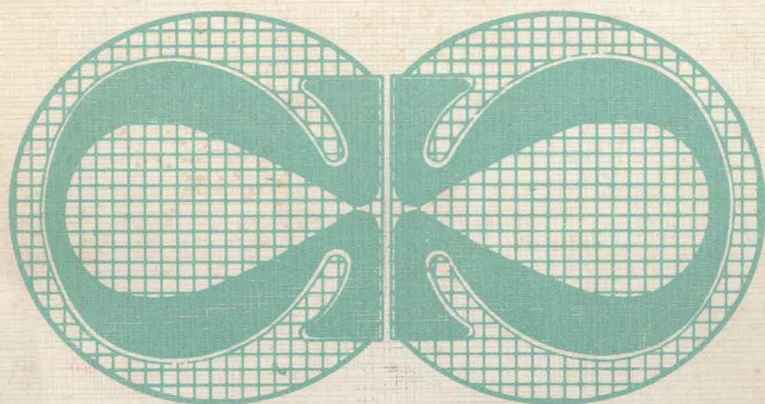


電路工程學

(下 冊)

原著者 R. E. RIDSDALE

譯 者 李英南 李佩芸



曉 園 出 版 社

下冊目錄

第四部分 交流電路 471

第十一章 波形 472

- 11-1 交流、直流的電壓與電流 ☐ 11-2 波形的大小值 ☐
- 11-3 週、週期、頻率、波長 ☐ 11-4 正弦波的重要性 ☐
- 11-5 正弦波 ☐ 11-6 正弦波的數值

第十二章 相位和相量 517

- 12-1 相位 ☐ 12-2 相量圖 ☐ 12-3 極式及直角坐標表示法
- ☐ 12-4 相量的計算 ☐ 12-5 阻抗及導納 ☐

第十三章 獨具 R、L 或 C 的交流電路 541

- 13-1 電阻 ☐ 13-2 電容 ☐ 13-3 電感 ☐ 13-4 功率 ☐
- 13-5 頻率阻抗及導納

第十四章 RC 或 RL 交流電路 562

- 14-1 串聯 RC 電路 ☐ 14-2 串聯 RL 電路 ☐ 14-3 並聯 RC 電路
- ☐ 14-4 並聯 RL 電路 ☐ 14-5 串聯、並聯的轉換 ☐
- 14-6 串 - 並聯電路

第十五章 RLC交流電路(無諧振)	654
15-1 R L C串聯電路□ 15-2 R L C並聯電路□	
15-3 R L C串並聯電路□	
第十六章 諧振電路	694
16-1 無電阻的諧振電路□ 16-2串聯 R L C諧振電路□	
16-3串聯 R L C電路的頻寬□ 16-4並聯 R L C諧振電路□	
16-5並聯諧振電路的頻寬□ 16-6實用並聯諧振電路□	
16-7 諧振的應用	
第十七章 交流網路	760
17-1網路分析法的應用□ 17-2交流電橋電路□	
17-3多相電路□ 17-4電子電路	
第十八章 耦合電路	804
18-1 雙枝電路□ 18-2雙枝網路參數□ 18-3阻抗(z)參數□	
18-4導納(y)參數□ 18-5 Z 與 Y 參數的方向性□	
18-6併合(h)參數□ 18-7 h 參數的方向性□	
18-8當作雙枝網路的變壓器□ 18-9作為雙枝網路的電晶體	
附 錄	869

第四部分

交流電路

簡介

穩定的直流電路中，電流與電壓的方向，大小固定，故電容中沒有電流，電感兩端沒有電壓，僅電阻有效。

電路中突然接入或拆掉直流電源，即形成直流暫態電路，此時電容，電感與電容均有效。這種電路中，電流與電壓的大小值不定，方向與極性也會改變。

現在我們繼續討論交流電路，包括電源電動勢在內的各電壓極性都會改變，各電流的方向也會改變。雖然直流電路的原理與交流電路相關，但我們將採用幾個完全不同的觀點去分析交流電路。

交流電路課程的脈絡繫於相位 (phase)。所謂相位，是各電壓與電流之間的時間關係。正弦波也很重要，故課程中先討論正弦波的本質與交流電路中正弦波之意義。

直流電路分析中所用的網路定理也適用於交流電路。但必須藉電壓與電流的變化效果來討論，此種討論比起對應的直流電路來說，計算方法要複雜些，也增加一些新名詞，例如：阻抗、導納、電抗、電納、頻率。複數物理量。

第十一章

波形

交流電壓、電流、功率都是時變的物理量，其大小隨時間而變化。研究交流電路的主要着眼點在於時間與物理量大小之間的關係式。

前十章中，電路的電壓與電流值不變，且任何時間下的電壓—電流關係式一定。電壓和電流變化時，導致交流電路的變化，並不值得重視，這一類觀念在直流暫態電路中討論過。直流暫態電路中，電壓和電流也隨時間而不同，但只要電源一直接入電路中，電壓和電流值就穩定下來。然而交流電路中，即使電路一直維持通路，電壓與電流的大小仍然連續的改變。

本書的交流電路課程，先在時變的基礎下，比較穩定的直流，變化的直流與交流，然後介紹幾種電學和電子學上常見的波形，並特別強調正弦波的重要性，接著提出幾個交流的術語以便繼續研究交流電路中的電阻、電容、電感。

交流 (ac) 意謂者變化 (alternating)，可以表示電流的變化，或是電壓的變化，當書中寫著 交流電流 (ac current) 即表示變化的電流 (alternating current) 而交流電壓 (ac voltage) 即表示變化的電壓 (alternating voltage)。這種符號的應用為電器與電子工業的傳統。

11-1 交流、直流的電壓與電流

直流電壓的極性不變，直流電流的方向不變，但其數值大小未必不變，穩定的直流電流或電壓是特例。

直流電流與時間的關係，可用圖 11-1 的波形表示出，圖 11-a 為穩定的直流，水平的時間軸上，1 秒鐘內，電流固定在 3 A。

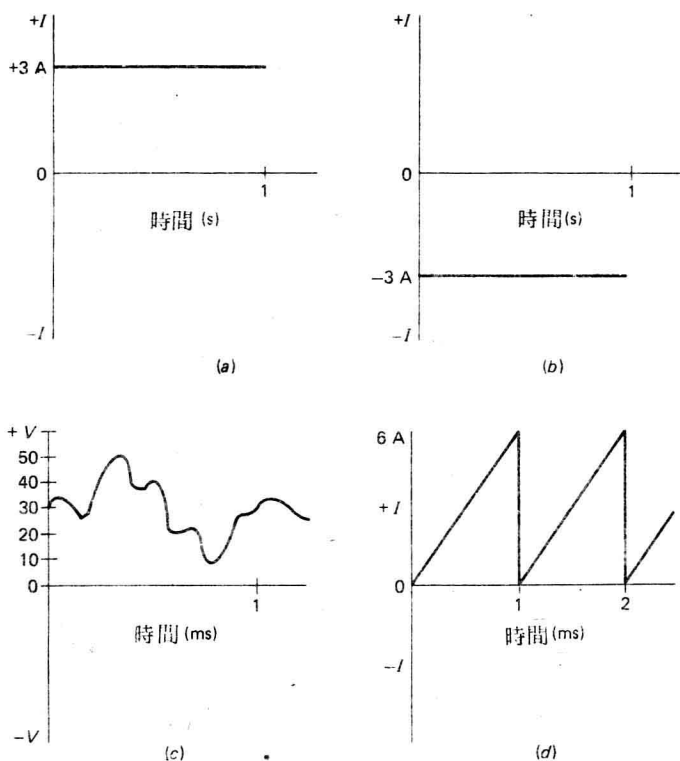


圖 11-1 波形 (a)與(b)為方向相反的穩定直流(c)任意變化的直流電壓(d)鋸齒形的直流電流

圖 11-1 (b)亦為 3 A 的穩定直流，但數值為負號，而圖 11-1 (a)

爲正值，故知此二曲線所表示的電流數值相同但方向相反，正值電流並不代表特定的方向，任意選定即可，若某一電路中，順時針的電流定爲正值，則反時針的電流即爲負值。

圖 11-1 (c) 中的電壓極性不變，因爲 1ms 的時間內，電壓值均爲正號。雖然數值自 30 V 起，在 10 V 與 50 V 之間任意變化，此電壓仍爲直流電壓。

圖 11-1 (d) 的波形，雖然其最小值爲零，但始終未改變方向，故仍然屬於直流電流，圖中以線性的方式自 0 升高至 6 A ，然後降回 0 A 。然後每 1ms 的時隔之內，重覆此種作用，而形成週期性的直流波形。

圖 11-2 的電路涵蓋了圖 11-1 的所有狀況。圖 11-2 (a) 有一個定值的電流源，產生 3 A 的順時針電流，如圖 11-1 (a) 所示。

圖 11-2 (b)，也有一個定值電流源，產生 3 A 的反時針電流，如圖 11-1 (b) 所示。令順時針電流爲正值，就必須令反時針爲負值，恰如圖 11-1 (a) 與 (b) 所示。

圖 11-2 (c) 的可變電壓源，可產生圖 11-1 (c) 與 (d) 的波形。加於電阻上的電壓可如圖 11-1 (c) 中任意變化，也可以如圖 11-1 (d) 成鋸齒狀變化，因而產生所須的電流波形。

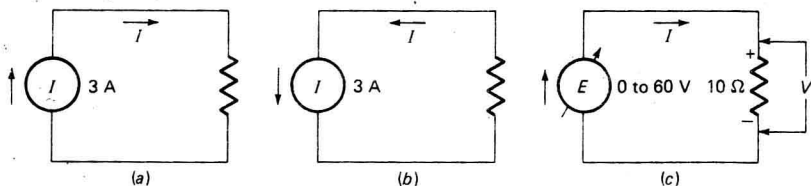


圖 11-2 產生如圖 11-1 直流波形的電路 (a) 順時針 3 A 的穩定電流 (b) 反時針 3 A 的穩定電流 (c) 變化的直流電壓或電流。

交流可以是週期的 (periodic)，就是每隔固定的時間，即產生相同的變化。也可以是任意的 (random)，就是每隔固定的時間，不產生相同的變化。因爲實用上較具意義，故本書僅討論週期性的交

流電路。

週期性的交流電壓極性與電流方向，每隔固定的時間就反向一次。在此固定時間內，電壓與電流的大小可以為定值，也可以變化。

圖 11-3 是一些典型的交流波形，圖 11-3 (a) 是方波的交流電流，在 1 s 之內其大小為定值 3 A，然後突然變成 -3 A，維持 1 s 後，再變回 +3 A。故此波形表示每隔 1 s 電流方向變換一次，在此 1 s 之內，電流的大小維持 3 A。這 1 s 之內的定值電流 +3 A 與 -3 A，若個別觀察，與圖 11-1 (a) 與 (b) 的直流電流相同。

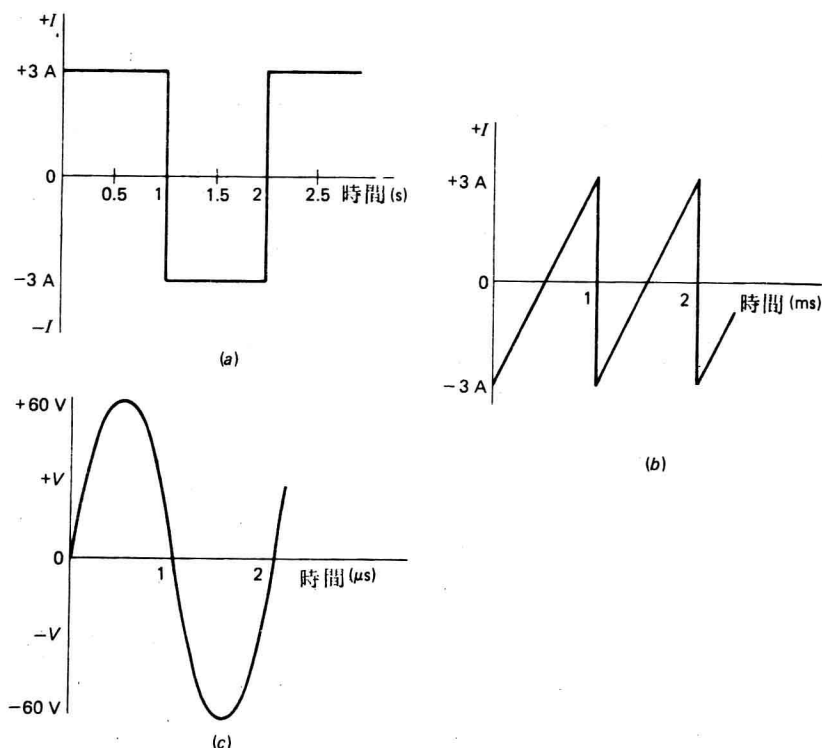


圖 11-3 波形 (a) 方波交流電流 (b) 鋸齒波交流電流 (c) 正弦波交流電壓

圖 11-3 (b) 的鋸齒波形所表示的交流電流與圖 11-1 (d) 的直流鋸

齒波相映成趣，此二圖都是線性遞增 6 A，然後降回原值，所不同的是交流鋸齒波電流，起初為某方向 3 A，漸趨 0 A 以後，電流反向，再升高至 3 A。

圖 11-3 (c) 為正弦波交流電壓，此波形在電器及電子技術中極重要，故本書的例題和習題中均用此波形。正弦波在 11-4 節至 11-6 節中有詳細的討論。

圖 11-3 的各波形，可由圖 11-4 的各電路產生。

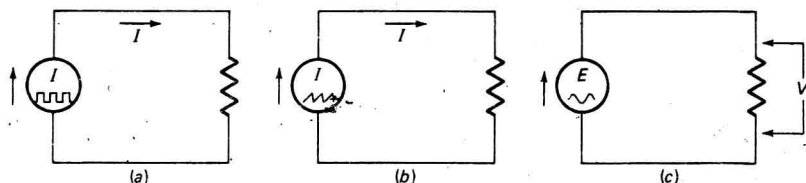


圖 11-4 產生如圖 11-3 中交流波形的電路 (a) 方波電流 (b) 鋸齒波電流 (c) 正弦波電壓

電源的符號

電源似乎沒有一般性的代表符號，直流電源如第十章所示，交流電源的符號規定如下，電流源如圖 11-4，以標示 I 的圓圈代表，電壓源以標示 E 的圓圈代表，圓圈內同時標示電源所產生的波形。

交流電路圖中的箭號

交流電壓的極性與電流的方向，每隔固定的時間改變一次，若電路中有電感或電容，又會引起電路中電壓極性與電流方向的交互變化，故交流電路圖中的箭號不像直流電路中代表單一的方向，此箭號只代表電壓和電流的存在，不表示極性和方向。

電路圖中的箭號有時特別具意義。以後見到交流並聯電感—電容電路時，各分路中的箭號方向相反，是表示某一瞬時各分路之電流方向相反。

圖 11-4 中，沒有標示電流和電壓的數值，因為交流電路中的各數值隨時間變化，故應以特別函數表示。

11-2 波形的大小值

波形影響電路中電壓與電流所造成的效果，儀器測試也受波形的影響，為了滿足不同功能與測試的需要，電流與電壓的大小可用幾個數值表示，每一種數值適用於一個特定的領域。

最大值（或峯值）

交流電流或電壓的最大值或峯值（maximum or peak value）為正與負軌跡中最大的數值，若波形如圖 11-3 為對稱形，則正與負的峯值相同，腳碼“max”用以標示最大值或峯值。

參考圖 11-3 (a)與(b)

$$I_{\max} = 3 \text{ A}$$

參考圖 11-3 (c)

$$V_{\max} = 60 \text{ V}$$

圖 11-5 (a)為方波，與圖 11-3 (a)同樣上下振盪 6 A。

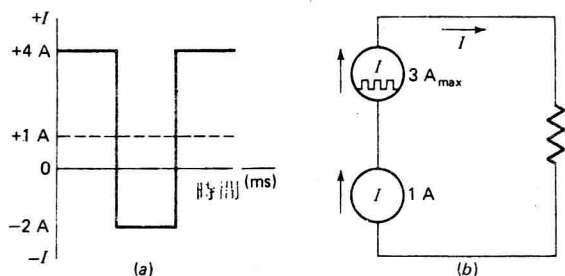


圖 11-5 (a)非對稱的方波電流(b)產生非對稱方波的電路

圖 11-5 (a) 的波形非對稱，故正與負的峯值大小不同，其峯值為

$$\text{正峯值} \quad I_{\max} = 4 \text{ A}$$

$$\text{負峯值} \quad I_{\max} = 2 \text{ A}$$

這一方波可視為兩部份的組合：一為對稱的交流矩形波，峯值 3 A，另一為 1 A 的穩定直流，兩者重疊。因此，電流在 +1 A 的上下 3 A 之間振盪，此電流稱為具有 +1 A 的直流水準，圖 11-5 (b) 的電路中，以 1 A 的直流電源提供直流水準，再串聯峯值為 3 A 的矩形波交流電源。

保護線路，元件，儀器所須的最低絕緣程度，由加於該線路的交流電壓之峯值來決定。

欲測峯值電壓，常將波形顯示在示波器上，再測波峯與水平零軸之距離，正與負的峯值可藉此分別測出。

欲測峯值電流，可將待測電流通入已知電阻中，電阻兩端的電壓，其波形與電流波形相同，其大小與電流之大小成比例。另一方法是用電流探棒，此為一種特別的變壓器，可將電流換成電壓。上述兩種電流導出的電壓，都顯示在示波器上，測出電壓峯值後，再用歐姆定律算出電流峯值。

峯對峯值

交流波形的最大正值與最小負值之間的差距，稱為峯對峯值 (peak-to-peak value) 腳碼 “p - p” 常用以表示峯對峯值。

圖 11-3 (a) 與 (b)，電流的峯對峯值為：

$$I_{p-p} = 6 \text{ A} \quad \text{從 } +3 \text{ 至 } -3 \text{ A}$$

圖 11-3 (c)，電壓的峯對峯值為：

$$V_{p-p} = 120 \text{ V} \quad \text{從 } +60 \text{ 至 } -60 \text{ V}$$

圖 11-5 (a)波形的峯對峯值與圖 11-3 (a)(b)相同

$$I_{p-p} = 6 \text{ A}$$

圖 11-5 (a)的 6 A 是從 +4 至 -2 A

峯對峯值的觀念可用於變化的直流波形，以便找出其中的交流成份。變化的直流電流或電壓中的交流成份，即其中數值大小的變化量。如圖 11-1 (c)任意變化的直流電壓中，可發現 +10V 至 +50V 之間所發生的變化量 40V，故此波形具有 40 V_{p-p} 的交流成份。

圖 11-1 (d)的鋸齒波形電流為直流，且與圖 11-3 與圖 11-5 具有同樣峯對峯值的交流成份。

$$I_{p-p} = 6 \text{ A}$$

附帶一提的是，如圖 11-1 (a)與(b)中的穩定直流，其峯對峯值為零。峯對峯值僅用在電流變化量夠大的時候，試看圖 11-3 (a)與圖 11-5 的電流，若某一特殊應用中，着眼於最大正值與最小負值之間的差距 6 A，今兩圖電流之峯對峯值均為 6A，可視為相同。故由峯對峯值導出兩電流等效，僅適用於此特殊應用。

峯對峯值不考慮直流水準，故直流水準影響重大時，不可用峯對峯值。

欲測電流與電壓的峯對峯值，最好使用示波器，只要測出銀幕上最高峯與最低峯之間的差距，再將此差距與示波器的垂直單位相結合即可。正因為用示波器可以輕易的測出複雜波形的峯對峯值，所以電子工業中廣泛應用此值。

瞬時值

一波形的瞬時值 (instantaneous value)，即某一特定瞬時的數值，所謂特定瞬時 (specified instant) 即波形曲線水平軸上特定的一點，通常水平軸代表時間，有時也代表角度與距離，圖

11-1 , 11-3 , 11-5 的水平軸均代表時間。

特定瞬時常以某一參考時間 t_0 以後的時間表示，參考時間 t_0 有以下幾種意義：

1. 開關成通路的時間
2. 開始觀察的時間
3. 曲線的原點，此意義參考圖 11-1 , 11-3 , 11-5 波形的圖形表示法，原點為縱軸與橫軸的相交點。
4. 波形數值為零的時間，用此意義時，首先確定以那一個零點為準。例如圖 11-3 c , $t = 0 \mu s$ 與 $t = 2 \mu s$ 時，電壓為零且向正方向振動。 $t = 1 \mu s$ 時，電壓亦為零且向負方向振動。
瞬時值以小寫符號表示，以圖 11-3 (a) 為例，令 t_0 為曲線的原點
 $t = 0.5 s$ 時

$$i = +3 A$$

$$t = 1.5 s \text{ 時}$$

$$i = -3 A$$

$$t = 1 s \text{ 時}$$

$$i = \pm 3 A$$

最後一例須加解釋，若電流在某一瞬時自 $+3 A$ 變至 $-3 A$ ，則此時的電流必同時具此兩值。雖然電流不可能在瞬間有如此大的變化，但變化所須之時間極短，故可如上處理。若電流在 $1 ns$ 內自 $+3 A$ 變至 $-3 A$ ，則變化所須之時間可視為零，因為 $1 ns$ 與 $1 s$ 相較，可以忽略。如欲表示發生變化之前的瞬時或之後的瞬時，可如下處理

$$t = 1 s \text{ 之前的瞬時}$$

$$i_{1s-} = +3 A$$

$t = 1\text{ s}$ 之後的瞬時

$$i_{1s+} = -3\text{ A}$$

平均值

交流電流或電壓的平均值 (average value)，即波形正或負部份的平均數值。若波形為對稱，則正值曲線與負值曲線相同，故其平均大小相同。非對稱波形的正值曲線與負值曲線不同，故必須個別標示正平均值或負平均值。

首先必須能區別平均值 (實用的) 與真平均值 (理論的)。

圖 11-6 的波形為對稱的三角形電壓，20ms 的時間內，電壓在 +10V 與 -10V 之間成線性，今欲決定 20ms 時間內的平均值，我們可發現各瞬時的正值皆被等值異號的負值所抵消，故其真平均值為 0V，對稱波形在數值與變化方向 (向正值振盪或向負值振盪) 均相同的兩瞬時之間取平均值，即得此零結果，故真平均值在標示對稱交流波形的相對大小時，無實際用途，然而非對稱波形的真平均值與其正、負峯值有關。

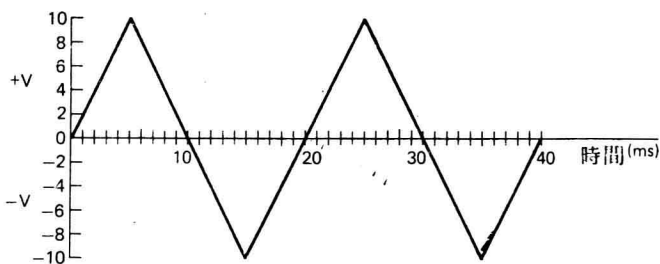


圖 11-6 三角波形的電壓

圖 11-6 的對稱電壓中，若在電壓值全為正或全為負的時間內求出平均值，則與峯值有關，這種平均值可用以比較形狀相同但峯值不同的波形。在 $t = 0$ 至 $t = 10\text{ ms}$ 或 $t = 20\text{ ms}$ 至 $t = 30\text{ ms}$ 的

10ms 內，電壓恆正，其平均值為 +5 V，在 $t = 10$ 至 $t = 20$ ms 或 $t = 30$ 至 $t = 40$ ms 的 10ms 內，電壓恆負，其平均值為 -5 V，平均值為峯值 10V 的 50%，故正或負的平均值可顯示波形大小，實用電功中，視 5 V 為此波形的平均值，腳碼“av”用以代表平均值。

參考圖 11-3 (a)

$$I_{av} = 3 \text{ A}$$

參考圖 11-3 (b)

$$I_{av} = 1.5 \text{ A}$$

參考圖 11-5

$$\text{正值 } I_{av} = 4 \text{ A}$$

$$\text{負值 } I_{av} = 2 \text{ A}$$

圖 11-3 (c) 中正弦波的平均值，留待 11-6 節討論

幾乎所有用以測電流和電壓的電表都基於轉動線圈 (moving coil) 的原理，此種裝置須直流驅動，若用對稱的交流，則指針標示為零。若此種裝置用來測交流電流或電壓，則須接上整流器，整流器可使電流維持定向。此時指針的偏轉與交流波形的平均值成正比。

雖然交流電表常以方均根值校正其刻度，但轉動線圈的裝置則以平均值校正刻度，且為最通用的測試工具。

方均根值或 rms 值 (root mean square value)

交流波形的方均根值為實用上應用最廣泛的數值，可用以統一各波形，如交流穩定的直流，變動的直流等，此值使電流，電壓的波形與功率能量相連繫，正因此值關係著能量的轉換（如電阻中的熱消耗），故又稱為有效值 (effective value) 除非特加說明，交流的電流或電壓數值均視為方均根值。

所謂交流的方均根值，即以功率或能量的觀點所求出的特定數值，此數值與等值的穩定直流等效。若 1 A 的穩定直流可點亮電燈，則方均根值 1 A 的交流亦可使此燈達同樣亮度。方均根值的觀念如下獲得：

1. 已知電阻，功率可用電流與電壓表示

$$P = I^2 R \quad \text{或} \quad P = \frac{V^2}{R}$$

功率與電流或電壓之平方成正比

2. 穩定的直流，其功率為定值，若電流與電壓變化，則瞬時功率亦改變，此變化的功率可以其平均值代表穩定的等效值。當交流功率以電流或電壓表示時，即導出方均根值：

$$P_{av} = I_{rms}^2 R \quad \text{或} \quad \frac{V_{rms}^2}{R}$$

$$I_{rms}^2 = \frac{P_{av}}{R} \quad \text{或} \quad V_{rms}^2 = P_{av} R$$

3. 欲得電流與電壓的 rms 值，必須取平方根 (square root)

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{P_{av}}{R}} \quad \text{或} \quad V_{rms} = \sqrt{P_{av} R}$$

以上三條包括了平方 (square)、平均 (mean)、方根 (root)。方均根 (rms) 一詞即充分描述了上述的運算：將電流或電壓值平方，再取均值，再開平方根。

圖 11-3 (a) 的電流在開始 1 s 內為定值 +3 A，其平方為 +9 A²。下面的 1 s，電流為 -3 A，其平方仍為 +9 A²。故平方的平均值仍為 9 A²。取平方根得 3 A。故方波的 rms 值與其峯值相同。事實上 (-3 A)² 與 (+3 A)² 不僅在數學上相同，而且電學上亦獨具意義，因為任何方向的電流所造的功率消耗相同。

欲求其他波形的 rms 值，不像方波那麼簡單，即使如圖 11-3

(b) 的鋸齒波也須用微積分求 rms 值，其原理仍是將各瞬時值的平方取平均，再開方，即得 rms 值。正弦波的 rms 值留待 11-6 節討論。

交流電壓與電流的大小常以 rms 值表示，故電表須能顯示 rms 值，但多數電表測出交流波形的平均值，故電表的刻度盤須調整至標示 rms 值方可。rms 值與平均值的關係為波形的函數，故常用某一特定波形完成刻度之調整。多數商用交流電表的刻度，調整至顯示正弦波的 rms 值，然而用其他的波形調節刻度亦未嘗不可。

例題 11-1：圖 11-7 的電流波形中，試求 (a) 正峯值 (b) 負峯值 (c) rms 值 (d) t_0 以後 2.5 ns 時的瞬時值。

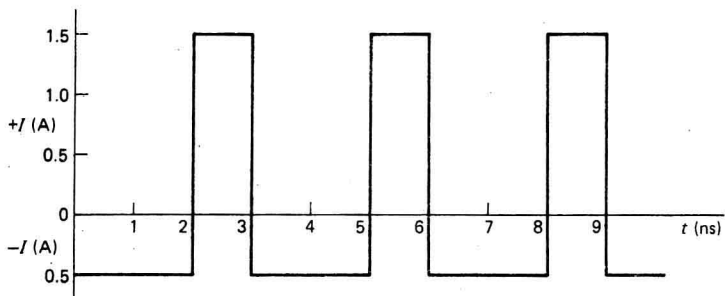


圖 11-7 例題 11-1：電流波形

解：圖 11-7 為一非對稱的方波，故正、負峯值應分別討論

a. 正值 $I_{\max} = 1.5 \text{ A}$

b. 負值 $I_{\max} = 0.5 \text{ A}$

c. 正值平方的平均 $= (1.5 \text{ A})^2 = 2.25 \text{ A}^2$

負值平方的平均 $= (-0.5 \text{ A})^2 = 0.25 \text{ A}^2$

圖 11-8 為 3 ns 週期（曲線完整變化的時間）中， I^2 的圖形。 I^2 曲線的平均值可將曲線與水平軸之間的總面積，除以週期 3 ns

$$\text{曲線下的總面積} = 0.25 \text{ A}^2 \times 2 \text{ ns} + 2.25 \text{ A}^2 \times 1 \text{ ns}$$

$$\text{總面積} = 2.75 \text{ A}^2 \cdot \text{ns}$$