

基本

線性電路分析

CIRCUIT ANALYSIS

何金滿 譯著

Leonard S. Bobrow

國立編譯館主編
中央圖書出版社發行

基本 線性電路分析

何金滿 譯著

私立中原大學電機系教授

國立編譯館主編
中央圖書出版社發行

行政院新聞局出版事業登記證
局版台業字第〇九二〇號

國立編譯館主編

基本線性電路分析
版權所有·翻印必究
實價新幣叁佰伍拾伍元整

原著者：Leonard S. Bobrow

譯著者：何金

出版者：中央圖書出版社

台北市重慶南路一段一四一號

發行人：林在

發行所：中央圖書供應社

台北市重慶南路一段一四一號

電話：三三一五七二六
三七一八九三

郵政劃撥帳戶：九一四號

印刷所：利康印刷有限公司

三重市民生東街廿六之一號

中華民國七十二年五月初版

中華民國七十三年第二刷

編號：2889

作者原序

本書是為三年級水準的學生而寫，以作為電路與系統的開始課程。在前七章及附錄中有足夠材料以供第一學期課程之用，而其次的五章可為第二學期課程的基礎。在進度較快的學校，可包含最後兩章之一或全部。如學校採用學季制，則可作為三個學季之用。

本書以傳統的講題如電壓、電流、電源、電阻、及歐姆定律等開始介紹。假設讀者已修過大一物理且對電學與磁學的物理已有基本概念。這些講題的較高深探討雖有助於說明，但在此並不需要，因對此類題目的更明示方法在需要時即可修習。並且也假設讀者已修過含微分與積分的基本微積分學。

目前有很多學生對矩陣的符號，矩陣的算術，及行列式的一些應用（如克拉莫規則）已有經驗，有關矩陣及行列式的附錄即為供此類讀者複習之用。對有多數學生不熟悉這些講題的學校，附錄中的材料應在第二章的討論電路分析技巧時或之前介紹。

為免另立一章以介紹網路拓撲學，在本書中我依其對電路分析的應用而隨時介紹一些拓撲的觀念。

許多電路的課本似乎都以延後介紹或迴避的方式忽略非正弦波的信號與波形。在本書，此主題則為討論電感器與電容器時的一部份。同時提早研討一個日愈重要的課題，即運算放大器。運算放大器電路依序在後面幾章隨時出現。

一階及二階電路的涵蓋是傳統且自動包含常係數線性微分方程式的解法。用微分方程式描述電路的符號，在狀態變數分析該章中延伸至矩陣的列式。然而，在該處則強調用電子計算機求數值解。

由時間領域到頻率領域的變換則在正弦分析章中介紹。由其所得的概念也應用於次章的功率，隨後則以複頻率的符號予以一般化

。正弦的奇妙性在研讀傅立葉級數，及由其延展的傅立葉變換時將更明顯。同時也可看到對後者的限制可由使用拉氏變換來克服。

本書的內容隨著進度漸增其困難度。一個第二學期的學生已有一學期的經驗，而第一學期的學生則幾乎完全不熟悉——此二種情形有很大的不同。

教科書應包括許多例題，且這些例題應解說詳細以使讀者能從頭到尾了解是我所抱持的哲理。我發覺這樣的說詞“可被證明……”會令人不快。因雖然我也許能證明它，但讀者則未必能。在此情況，如我不向讀者證明（而讀者不能或不願證明）則所考慮的結果將不甚有意義。當然，為實際的理由，有我必須不需正式求證而讓結果顯示的一些甚少例外存在。

不由一個一般化的觀點來開始接觸一個主題，我選擇了以學生所能了解的例題開始，然後自然地演進到某些新的或提示一些新的東西。當然，一般化是必需的，但應在學生看過一些特殊性後再呈現（如可能的話）。詳細的解題能給學生一些對解題過程及主題材料的感覺。因而使他們更易於抓住一些更一般化的概念。由於本書主要是針對首次面對此種新材料而想去學習它的人所寫，我覺得這種方法在教育法上是較優良的。

學習過程中的一個極重要部份牽涉了解題。甚至在學生了解本書每個例題的每個步驟後，乃並不意味他不需協助即能解題。為獲得信心與敏捷（及洞察力）讀者應多做習題。本書給了許多作業，不僅是在每章的最後，且出現在大部份各節之後。（在較短的節次，則合併連續的數節一起提供一合併的概念當做練習。）尤其是提供了比家庭作業所需還多的習題。在每群習題中，有些附有星號（*），其答案已給予。本書所有問題的解答在隨附的解答手冊中都有。有許多問題，其值及其拓撲的選擇可視為是實際情形的典型。然而，因本書所強調的是電路分析的觀念，而非數值的計算，故大部份電路（有實際圖形者亦然）中的元件值都甚為簡單。

本書的寫作風格似乎比典型的教科書非正式些。但正如本書的目的是傳遞資訊與觀念，我覺得教科書的寫作方式應能使讀者（他將為它花不少時間）感覺舒適是重要的。我個人認為此種非正式性

會使學生感覺所受到的威脅較少。

我將感激指出本書及解答手冊中任何的打字錯誤以便將來再版時更正。我尤其歡迎與本書有關的一些意見與批評。

在此我特別感謝許多幫助及鼓勵我的親友們。尤其同事所提供的意見使本書更完善。在此一併致謝。

Leonard S. Bobrow

1981 於美國

目 錄

作者原序

第 一 章 基本元件與定律

1-1	理想電源	1
1-2	電阻器與歐姆定律	6
1-3	克希荷夫定律	16
1-4	相依電源	43
1-5	功率	53

第 二 章 電路分析技巧

2-1	節點分析	64
2-2	網目分析	86
2-3	迴路分析	104

第 三 章 重要的電路觀念

3-1	非理想電源	116
3-2	最大功率轉移	124
3-3	戴維寧定理	126
3-4	重疊定理	146
3-5	運算放大器	155

第 四 章 能量儲存元件

4-1	電感器	171
-----	-----	-----

4-2	電容器	178
4-3	斜坡，步級，與脈衝	187
4-4	積分關係式	202
4-5	串聯與並聯	217
4-6	網目與節點分析	219
4-7	對偶性	222
4-8	線性與重疊	225
第五章 一階電路		
5-1	零輸入響應	235
5-2	零態響應	253
5-3	不依時變	258
5-4	激勵與自然響應	261
5-5	線性與重疊性	271
5-6	一些其他激勵函數	279
5-7	一些其他一階電路	286
第六章 二階電路		
6-1	串聯 RLC 電路	296
6-2	並聯 RLC 電路	303
6-3	串並聯 RLC 電路	309
6-4	非零輸入的電路	315
第七章 狀態變數分析法		
7-1	零輸入電路	330
7-2	狀態方程式的數值解	339
7-3	非零輸入的電路	349
7-4	寫狀態方程式的法則	362
第八章 正弦分析		

8-1	時間領域分析	372
8-2	複數	380
8-3	頻率領域分析	386

第九章 功率

9-1	平均功率	413
9-2	有效值	423
9-3	複功率	431
9-4	單相三線系統	438
9-5	三相電路	442
9-6	功率的測量	452

第十章 重要的交流觀念

10-1	頻率響應	460
10-2	諧振	466
10-3	定比	485
10-4	複頻率	489
10-5	頻率響應的圖解	503

第十一章 雙埠網路

11-1	變壓器	510
11-2	理想變壓器	521
11-3	雙埠導納參數	531
11-4	其他的雙埠參數	541

第十二章 傅立葉級數

12-1	三角傅立葉級數	554
12-2	複傅立葉級數	582

第十三章 傅立葉變換

13-1	傅立葉積分	592
13-2	重要函數的變換	595
13-3	傅立葉變換的應用	614
13-4	對電路的應用	622
第十四章 拉卜拉士變換		
14-1	拉卜拉士變換的性質	639
14-2	部分分數展開法	652
14-3	對線性系統的應用	662
14-4	網路分析	674
附 錄	矩陣與行列式	691

第一章 基本元件與定律

簡 介

電路的研討是電機工程教育的基本，而在其它的訓練，也是很有價值。從研討中所學得的技巧不僅適用於如電子、通訊、微波、控制與電力系統的電機領域，並也適用於某些不同的領域中。

電路 (Electric circuit) 或 **網路** (Network) 的意義為，以某種方式連接在一起的電路元件 (如電壓源與電流源、電阻、電感、電容、變壓器、放大器，和電晶體) 的集合。電路的許多應用，雖然極為重要，但並不是本書的重點，相反的，我們的主要興趣在於如何對一個已知的電路，來決定它的行為——即通常所謂的**分析** (Analysis)。

一開始，我們將先討論一些基本的電路元件，以及描述它們的定律。我們假設讀者已在高中及大學的物理中，學得了有關電荷、電位，與電流的觀念：

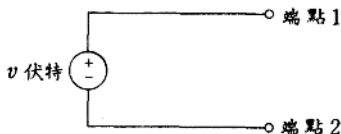
1-1 理想電源

爲了紀念法國科學家查理士·得·庫侖 (Charles de Coulomb, 1736 ~ 1806)，電荷是以**庫侖** (Coulomb, 簡寫爲 C) 來計量的，而功或能量的單位——**焦耳** (Joule, 簡寫成 J) 則是以英國物理學家詹姆士·焦耳 (James P. Joule, 1818 ~ 1889) 命名。雖然電荷在電場中所消耗的能量單位爲焦耳/庫侖，爲了紀念義大利的物理學家亞力山卓·伏塔 (Alessandro Volta, 1745 ~ 1827)，我們給它一個特別的名字**伏特** (Volt, 簡寫成 V)，並稱之爲電位差或電壓的度量。

2 基本元件與定律

如圖 1-1 所示，理想的電壓源是一種能在它的端點間產生 v 伏特的電壓或電位差，而與連接於它的東西無關的裝置。

圖 1-1



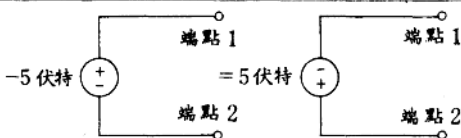
在圖 1-1 中，元件的端點 1 被標上正號 (+)，端點 2 則為負號 (-)，這告訴我們端點 1 的電位要比端點 2 的高 v 伏特。(換句話說，端點 2 的電位要比端點 1 的低 v 伏特。)

v 可以是正的或負的，對後者而言，我們可以用一個正值來得到一個等效電源，下面的例子即在闡釋此點。

【例】

假設 $v = -5$ 伏特，則端點 1 的電位要比端點 2 的高 -5 伏特，然而，這亦等於表示端點 1 的電位要比端點 2 的電位低 $+5$ 伏特，因此，圖 1-2 所示的兩個理想電壓源是互為等效的。

圖 1-2



在上面的討論中，我們已暗示理想電壓源的電壓為定值，亦即，其值不隨時間變化，此情況如圖 1-3 所示。通常，理想電壓源也可以用圖 1-4 的方式來表示，此處，我們稱此裝置為一個理想電池

圖 1-3

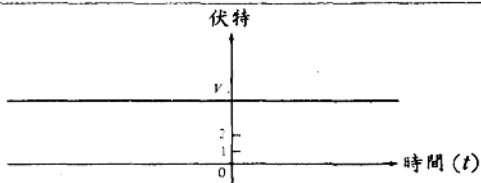
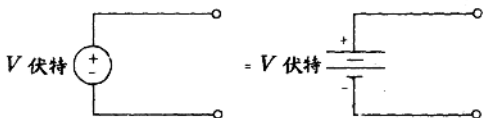


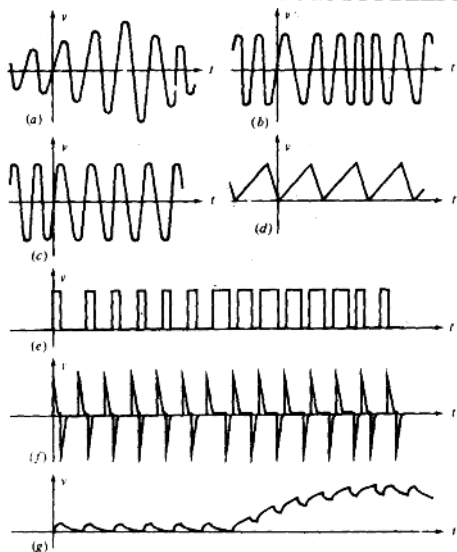
圖 1-4



(Ideal battery)。雖然，實際的電池並不是理想的，但在許多情況下，理想電池仍是很好的近似，就拿你的手提電晶體收音機來說吧，有的用 9 伏特電池，也有些不同的型式使用四個或六個“C”或“D”型的 1 ½ 伏特電池。在第 3 章裡，我們會更進一步討論“實際的”電壓源。

然而，一般由理想電壓源所產生的電壓 (v) 仍會是時間 (t) 的函數，圖 1-5 所示即為 n 個典型的電壓波形，圖(a)與(b)的波形分別為典型的 AM (調幅, amplitude modulation) 與 FM (調頻,

圖 1-5



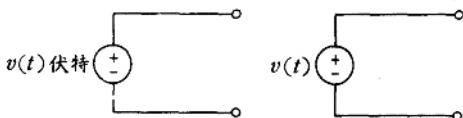
Frequency modulation), 的訊號，二者均使用於一般的收音機通訊中。圖(c)所示的正弦波則有廣泛的用途；舉例來說，它為普通家電用具電壓的波形，此類波形的頻率常被用來做為一個參考的訊號，如電視機中的彩色檢波 (Color detection) 即是。圖(d)所示的“鋸

4 基本元件與定律

齒波”可用來掃描(Sweep)電視機(或示波器)中的電子束。圖(e)所示的脈沖列(Pulse train)則可用來包含視頻訊號所需要的水平與垂直同步的訊息，圖(f)與(g)的波形可由圖(e)中的獲得，但前者用於同步水平振盪器，後者則用於同步垂直振盪器。因電源所產生的電壓通常是時間的函數，如 $v(t)$ ，因而理想電壓源的最一般化表示。即如圖1-6。若在電源的表示符號中不使用單位“伏特”，應不

圖 1-6 (左)

圖 1-7 (右)



致引起任何混淆，因此，圖1-7所示的理想電壓源應與它前面的那個相等。為了更進一步的說明，讓我們圖1-7的理想電壓源，描述它的函數 $v(t)$ 如圖1-8所示，圖1-9所示則為在六個特定時間中電

圖 1-8

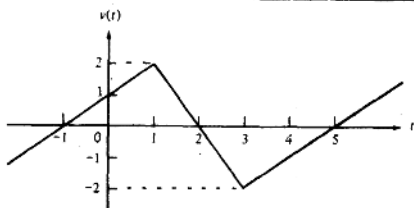
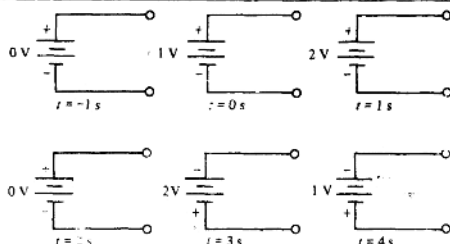


圖 1-9



源的行為，舉例來說，在 $t = 1$ 秒時，此電源如同一個2伏特的理想電池。

若將一個電壓差跨接於某個物質，通常都會產生電荷的流動，負電荷(以電子的形態)由一個既有的電位向更高的電位流動，相

反的，正電荷則由一個既有的電位流向更低的電位，電荷通常以 q 表示，而又由於它常隨時間變化，所以常把流動電荷的總量表示為 $q(t)$ 。

現在，我們定義**電流**(Current)為電荷的流動率，並將之表示為 $i(t)$ ，亦即，

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$$

又將電流的單位(庫侖/秒或 C/s)表示為**安培**(Amperes, 簡寫成 A)，這是為了紀念法國的物理學家安培(Andr'e Ampe're, 1775 - 1836)，此外，由於富蘭克林(Benjamin Franklin)的研究，電流的方向已被定為正電荷所流動的方向。

一個理想電流源如圖 1-10 所示，箭頭向上在與任何東西連接時，會由端點 2 拉進 I 安培的電流，並由端點 1 推出 I 安培的電流(反之亦然。)。依此定義，顯然地圖 1-11 中的兩個理想電流源是等效的。

圖 1-10

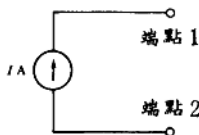
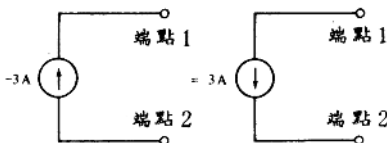
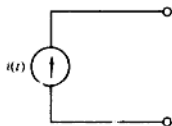


圖 1-11



又，一般由理想電流源所產生的電流量仍是時間的函數，因此，理想電流源的表示法一般均如圖 1-12 所示，其單位為安培。

圖 1-12



6 基本元件與定律

【問題】

1-1 若某個理想電壓源之值為 $v(t) = 10e^{-t}$ 伏特，則當(a) $t = 0$ 秒，(b) $t = 1$ 秒，(c) $t = 2$ 秒，(d) $t = 3$ 秒，(e) $t = 4$ 秒時，電壓源之大小分別為何？

答案：(a) 10 伏特，(c) 1.35 伏特，(e) 0.183 伏特

1-2 若 $v(t) = 5 \sin(\pi/2)t$ 伏特，重複問題 1-1。

1-3 若 $v(t) = 3 \cos(\pi/2)t$ 伏特，重複問題 1-1。

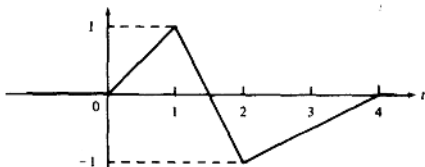
1-4 若某物質之總電荷量能以函數 $q(t) = 4e^{-2t}$ 庫侖來描述，試求經過此物質之電流。

答案： $-8e^{-2t}$ 安培

1-5 若 $q(t) = 3 \sin \pi t$ 庫侖，重複問題 1-4。

1-6 若 $q(t) = 6 \cos 2\pi t$ 庫侖，重複問題 1-4。

圖 P1-7



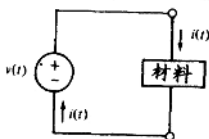
1-7 若 $v(t)$ 能以如圖 P1-7 的函數來描述，以此重複問題 1-4。

1-8 若某物質之總電荷量能以問題 1-7 中的函數來描述，試對經過此物質的電流 $i(t)$ 繪圖。

1-2 電阻器與歐姆定律

若我們將某物質跨接於一個理想電壓源 $v(t)$ 的端點間，如圖 1-13 所示，並假設 $v(t)$ 可由圖 1-8 的波形所描述，則在時間 t

圖 1-13



$= 0$ 秒時， $v(t) = 1$ 伏特。因此，該物質頂端的電位要比底端的電位高 1 伏特，則物質中的電子會由底端流向頂端，所以我們說電

流由頂端流向底端。因此，就以所標定的極性而言， $v(t)$ 是個正數，而 $i(t)$ 亦以所示的方向為一個正數。在時間 $t = 1$ 秒時， $v(t) = 2$ 伏特，則頂端的電位仍比底端的要高，所以， $i(t)$ 又會是正的。然而，由於在時間 $t = 1$ 秒時的電位為時間 $t = 0$ 秒時的兩倍，所以，在 $t = 1$ 秒時的電流會比 $t = 0$ 秒時的為大（若該物質為一個“線性”元件，則電流將會是兩倍）。在時間 $t = 2$ 秒時， $v(t) = 0$ 伏特，因此，頂端與底端的電位是相等的，其結果為沒有電子的流動，所以沒有電流產生，即 $i(t) = 0$ 。當 $t = 3$ 秒時， $v(t) = -2$ 伏特，因此，物質頂端的電位要比底端的低，依此會產生一個由底端流向頂端的電流，所以 $i(t)$ 會是個負數。所應注意的是，流經該物質的電流 $i(t)$ 亦流經電壓源，因為它沒有其他的地方可走。

在圖 1-13 中，若所產生 $i(t)$ 一直與任意函數的電壓 $v(t)$ 成正比，則該物質稱為一個**線性電阻器**（linear resistor）——或簡言之為**電阻器**（Resistor）。

由於電阻器上的電壓與電流是成正比的，所以必存在一個比例常數 R ，使得

$$v(t) = Ri(t)$$

我們稱此常數 R 為**電阻**（Resistance）。若在此式之兩邊除以 $i(t)$ ，則可得到

$$R = \frac{v(t)}{i(t)}$$

電阻的單位（伏特每安培）稱為**歐姆***（Ohm），並以希臘字母 Ω 表示之。圖 1-14 所示為一般電阻器之圖示法，其電阻值為 R 歐姆，圖 1-15 所示則為一個（線性）電阻器的電壓對電流的圖形。

圖 1-14

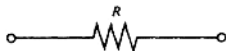
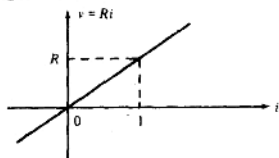


圖 1-15



*以德國物理學家喬治歐姆（George Ohm, 1787~1854）而命名。