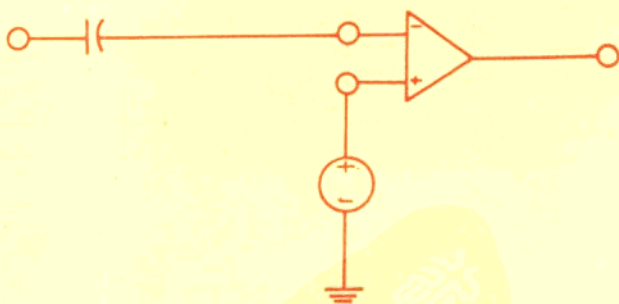
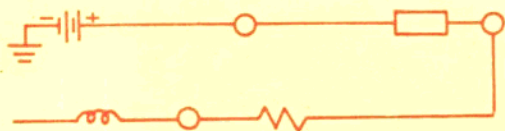


基本線性電路分析

原著者 L. S. Bobrow

譯著者 卓 中 興



曉 園 出 版 社

基本線性電路分析

原著者 L. S. Bobrow

譯著者 卓 中 興

曉 園 出 版 社

版權所有·翻印必究

再 版

1987年10月第二次印刷發行

基本線性電路分析

精裝本定價：新臺幣 350 元 港幣 105 元
平裝本定價：新臺幣 300 元 港幣 90 元

原 著 者：L.S. Bobrow

譯 著 者：卓 中 興

發 行 人：黃 旭 政

發 行 所：曉 園 出 版 社 有 限 公 司

HSIAO-YUAN PUBLICATION COMPANY LIMITED

臺 北 市 青 田 街 7 巷 5 號

電 話：(02) 394-9931 三線

郵 撥：1075734-4 號

門市部(1)：臺 北 市 新 生 南 路 三 段 96 號 之 三

電 話：3917012 · 3947375

門市部(2)：臺 北 市 重 慶 南 路 一 段 115 號

電 話：3313360 · 3149580

門市部(3)：臺 北 縣 淡 水 鎮 英 專 路 71 號

電 話：六 二 一 七 八 四 〇

門市部(4)：臺 中 市 西 屯 區 文 華 路 113 號

電 話：(04)251-2759 · 254-6663

香港藝文：九龍又一村達之路30號地下後座

圖書公司 電 話：3-805807 · 3-805705

印 刷 所：遠 大 印 刷 廠

臺 北 市 武 成 街 36 巷 16 弄 15 號

出版登記：局版臺業字第1244號

著作執照：臺內著字第 號

正如作者 Bobrow 在序言中說的，
本書用語平易，說理清晰，例證豐富
詳盡，稱得上是一本深入淺出的書。

譯者翻譯力求通順流暢，若讀者
能仔細閱讀，必能有系統地建立電路
分析的觀念。

原 序

這本教科書是專為大二程度的學生所寫的，做為電路和電系統的入門課程。本書前七章和附錄部份做為上學期的教材，分量已很足夠，後面五章則可作為第二學期的教材。如果學校的進度夠快，或許能上完最後兩章（十三、十四章）。如果是採取學季制的學校大概三個學季就可上完本書的內容。

本書一開始仍循例介紹一些老標題，如電壓、電流、電源、電阻、歐姆定律等等。本書肯定讀者已修過高中或大一物理，已具備電學和磁學的基本概念（如電荷、電位和磁場等等）。更高深的電磁學理論也許有助於對電路學的深入了解，但並非必要。另外，讀者應該也或多或少修過有關微積分的課程，對積分和微分也該懂得

許多學生也許對矩陣的記號、運算和某些行列式的應用（如克拉馬法則，Cramer's rule）已相當熟悉。在附錄裡有矩陣和行列式的說明，可供溫習。如果大部份的同學對矩陣和行列式都不熟，那麼在第二章之前，在課堂中應先講授矩陣和行列式，因為在電路分析中必須用到。

本書中不用專章來介紹網路的拓撲分析，而在全書中的任何適當部份加入拓撲的觀念，以應用於電路分析。

許多電路書籍似乎都忽略了非弦波信號及其波形，不是到了最後才介紹，不然便是根本不談。在本書中，在討論電感電容時，以完整的篇幅來介紹非弦波的分析。另外，我們也提早了操作放大器電路的分析（操作放大器日益重要）。操作放大器電路幾乎在本書的各章中都可看到。

一階電路和二階電路這兩章的內容，是傳統的分析方法，自成

體系，等於是在解係數為常數的線性微分方程組。微分方程組可以轉化成矩陣型式，此在狀態變數分析一章中介紹，該章中特別強調數值解（利用數位計算機）。

弦波分析一章將介紹由時域至頻域的轉換。由此導得的觀念應用在其後功率一章中，這些觀念可以利用複頻記號而一般化。弦波分析的精妙，在研習傅立葉級數展開和傅立葉轉換時，更易領會。也可以發現，傅立葉轉換的限制，可以用拉普拉斯轉換來克服。

本書的編排，隨著課程的進度，教材會越來越難。但第二個學期已經有了第一學期的基礎，不像第一學期剛接觸時那麼陌生，因此教材的難易也應有所區別。

教科書中應有許多例題，而且題解要首尾詳盡，使讀者有所取法遵循，這是我寫本書的理念。我發現諸如“像……”或“可以證得……”這樣的字句並不好，因為我也許能夠證得出來，但讀者不見得能導得出來。如果是這樣，我再不證給讀者看，而且讀者不會導或根本不想去導，那效果就要大打折扣。當然有時為了實際的理由，只給結果而不正式的推導。

本書對各論題，不打算在一開始時就用一般化的方式來討論，我喜歡用例子做開始，使學生易於理解，並使他們在例子中得到新的觀念。當然，一般化是必需的，但一般化應該在有許多特殊的實例之後再提出來。尤其在看過解答詳盡的例題之後，讀者必然對解題的過程和論題的內容都有深刻的印象，更有助於他們抓住這些一般化後的概念。本書主要是寫給初學者看的，他們是第一次來學習這些他們所要了解的課程，所以我覺得這種寫法對教學而言更佳。

解題在學習過程中是極重要的一環。讀者即使能看懂例題題解中的每一行，也並不代表說他已經會解題了。讀者必須做習題，才能建立自信以及良好的反應和洞察力。本書中有許多家庭作業式的習題，不只在每章之末，幾乎每節之後都有（如果某節的分量很少，該節的習題就併列在下一節之後）。另有一些習題已超過家庭作業

的程度，這些習題都已註上星號，也附了解答以供學生參考。本書中所有習題都有詳盡的解答，印成題解手冊。書中的許多習題都經過特別的設計，所選的數值和電路圖都能代表實際存在的電路。然而，本書的目的主要是著重電路分析的觀念而非數值計算，所以大部份的電路（包括含實體圖者在內）元件都給簡單的數值。

本書的寫法可能比一般教科書更注重前後的連貫性。所有書的目的都是在傳達概念和消息，因此教科書的寫法如果能讓讀者易於接受，似乎也蠻重要。個人認為，非公式的寫法比較不會嚇倒學生。

老師們發現書上或題解手冊上有任何錯誤時，如能不吝通知，感激不盡，下回再印時定當改正。另外，也很樂意得到有關本書的批評。

這本書今日得以出版，要感激許多人的幫助。我要感謝 Patricia Moriarty 女士，做為本書基幹的上課講義，大部份的打字是由她完成的，其他部份是 Erica Swanson 女士完成的。書中所給的 FORTRAN 程式，Donald Scott 教授幫了非常多的忙，成果令人激賞，Elizabeth M. Warriner 也應得到相同的感謝。另外也要謝謝 Scott 教授班上的同學，謝謝他們的校對。也要謝謝 Elliott Arkin 先生的封面設計。同時也該謝謝校閱過原稿的先生女士，他們給我絕佳的建議和批評，使本書更臻於完美。也要謝謝 Lila Gardner 女士和手稿的編輯 Robert Whitlock 先生，他們在出版印刷上的工作非常好。本書的編輯 Paul Becker 先生曾給我最大的鼓勵，他對我的計劃和能力極為信任，他不僅是個好伙伴，而且善體人意深具智慧。

Leonard S. Bobrow

目 錄

第一章 基本元件和基本定律 1

- 1-1 理想電源 1
- 1-2 電阻和歐姆定律 6
- 1-3 克希荷夫定律 17
- 1-4 受控電源 48
- 1-5 功率 59

第二章 電路分析技巧 69

- 2-1 節點分析 69
- 2-2 網目分析 93
- 2-3 迴路分析 112

第三章 重要的電路概念 125

- 3-1 非理想電源 125
- 3-2 最大功率轉移 133
- 3-3 戴維寧定理 135
- 3-4 重疊原理 154
- 3-5 操作放大器 164

第四章 能量儲存元件 181

- 4-1 電感 181
- 4-2 電容 188
- 4-3 斜波、步波和脈衝
197
- 4-4 積分關係式 213
- 4-5 串聯和並聯 228
- 4-6 網目和節點分析 231
- 4-7 對換性 233
- 4-8 線性和疊加性 236

第五章 一階電路 247

- 5-1 零輸入響應 247
- 5-2 零初始響應 265

5-3	非時變	271	5-5	線性和疊加性	284
5-4	強制響應和自然響應	274	5-6	其他的強制函數	292
			5-7	其他的一階電路	298
第六章 二階電路 309					
6-1	RLC 串聯電路	309	6-3	RLC 串並聯電路	322
6-2	RLC 並聯電路	316	6-4	非零輸入的電路	328
第七章 狀態變數分析 345					
7-1	零輸入電路	345	7-3	非零輸入的電路	366
7-2	狀態方程式的數值解	355	7-4	狀態方程式的建立規則	380
第八章 弦波分析 391					
8-1	時域分析	391	8-3	頻域分析	408
8-2	複數	400			
第九章 功率 439					
9-1	平均功率	439	9-4	單相三線系統	467
9-2	有效值	450	9-5	三相電路	472
9-3	複數功率	459	9-6	功率的量測	483
第十章 重要的交流觀念 493					
10-1	頻率響應	493	10-4	複頻	526
10-2	共振	500	10-5	圖解法求頻率響應	541
10-3	乘數變換	521			
第十一章 雙埠網路 549					

11-1 變壓器	549	11-3 雙埠的導納參數	572
11-2 理想變壓器	561	11-4 其他的雙埠參數	583
第十二章 傅立葉級數	597		
12-1 三角傅立葉級數	597	12-2 複數傅立葉級數	628
第十三章 傅立葉轉換	639		
13-1 傅立葉積分	639	13-3 傅立葉轉換的應用	664
13-2 重要函數的轉換	644	13-4 在電路上的應用	673
第十四章 拉普拉斯轉換	691		
14-1 拉普拉斯轉換的性質	691	14-3 線性系統上的應用	716
14-2 部分分式的展開	704	14-4 網路分析	727
附錄——矩陣及行列式	747		
索 引	763		

第一章

基本元件和基本定律

導 言

研習電路是電機工程教育的基礎，同時對其他學科也有相當的價值。在電路學中所得的技藝，不僅在電子、通訊、微波、控制和電力系統等電機工程領域中十分有用，而且也能應用到其他不同的領域。

電路 (electric circuit) 或網路 (network) 是指電機 (或電子) 裝置的組合 (這些裝置如電壓源、電流源、電阻、電感、電容、變壓器、放大器 and 電晶體)，這些裝置以某種方式接連在一起。這許多不同的電路各有不同的功用，這點雖然重要，但並非本書之重點。我們主要的目的，是當已知一個電路時，如何得知該電路將如何工作，也就是要分析 (analysis) 該已知的電路。

首先要討論某些基本的電路元件及相關的定律。這裡已先假定都有了電量、電位和電流的概念，這些在高中和大學的物理 (或其他的科學課程) 中都應上過。

1-1 理想電源

電量的單位是庫侖 (coulomb，簡寫為 C)，這是紀念法國科學家庫侖 (Charles de Coulomb，1736-1806)，能量 (或功) 的單位是焦耳 (Joule，J)，這是紀念英國物理學家焦耳 (James P. Joule，1818-1889)。單位電量所消耗的能量，其單位為 J/C，一般都稱為伏特 (volt，V)，這是紀念義大利的物理學家伏特 (Alessandro Volta，1745-1827)，伏特是電位差 (electric potential difference) 或電壓 (voltage) 的單位。

理想電壓源 (ideal voltage source)，如圖 1-1 所示。無論電源兩端所連接的電路為何，理想電壓源的兩端永遠維持 v 伏的電壓 (或稱電位差)。

圖 1-1

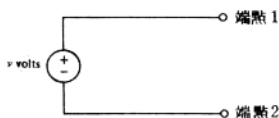


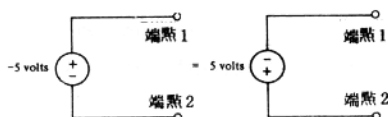
圖 1-1 的裝置，端點 1 上標有正 (+) 號，端點 2 則標負 (-) 號，這表示端點 1 的電位高於端點 2，且差額為 v 伏（也可以說，端點 2 的電位較端點 1 低 v 伏）。

電位差 v 可以為正值或為負值。若為負值，則我們可以用另一個電壓值為正的等效電源來代換，請看下列。

例

若 $v = -5$ 伏，即端點 1 的電位較端點 2 高 -5 伏。也就是說，端點 1 的電位較端點 2 低 $+5$ 伏。因此，圖 1-2 中的兩個理想電壓源為等效電源。

圖 1-2



由前面的討論，可以了解，理想電壓源的電壓值是一個常數，亦即不隨時間而變，這種情況如圖 1-3。理想電壓源通常用圖 1-4 中的等效記號來代表。我們稱這種裝置為理想電池 (ideal battery)。

圖 1-3

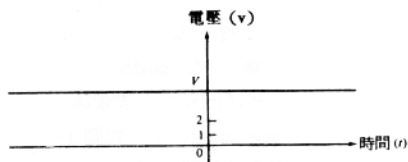
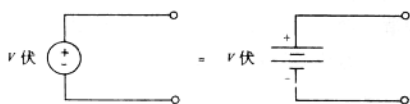


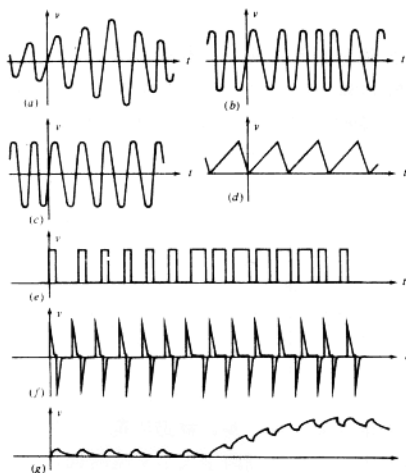
圖 1-4



雖然實際的電池並非理想電池，但在許多情況下，理想電池確實十分逼近實際的情況。一個實例是手提電晶體收音機的 9V 電池，也有用 4 個或 6 個“C”或“D”1.5V 電池的。第 3 章將對實際的電池作較多的討論。

一般而言，理想電壓源所產生的電壓，可以是時間的函數，圖 1-5 是

圖 1-5



一些電壓波形的例子。圖 a 和圖 b 分別是典型的調幅 (AM) 和調頻 (FM) 信號。這兩種信號都用在民用的收音機通訊上。圖 c 上的弦波，用途非

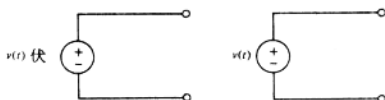
4 第一章 基本元件和基本定律

常廣泛，例如一般家用電源就是這種波形，弦波的頻率常做為參考信號，例如用在電視機的色彩識別上。圖 d 的鋸齒波則可用在電視電路或示波器，提供電子束的掃瞄。圖 e 的脈波可以用在視頻信號中，作為垂直和水平同步之用。而圖 f 和 g 的波形分別是從圖 e 的波形而來，前者用作水平同步，後者是用作垂直同步。

一般來講，電壓源所產生的電壓是時間的常數，記為 $v(t)$ ，因此理想電壓源最一般性的電路符號如圖 1-6 所示。若略去電壓單位（伏特）的註記，應不致產生混淆，所以理想電壓源可如圖 1-7 所示，電壓的單位為

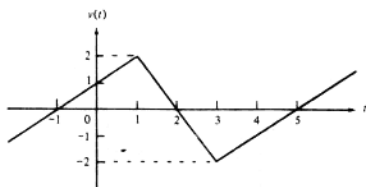
■ 1-6（左）

■ 1-7（右）



伏特。為使讀者在觀念上更為清楚，考慮如圖 1-7 所示的理想電壓源，其電壓對時間的函數如圖 1-8。圖 1-9 分別代表六個不同時刻時，電壓源的狀態。例如， $t = 1$ 秒時，電壓源的作用有如 2 伏的理想電池。

■ 1-8

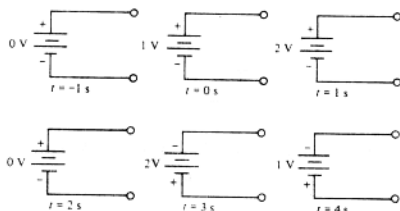


在某些材料的兩端加上電位差，會造成電荷的流動。負電荷（電子）由低電位流向高電位，而正電荷則由高電位流向低電位。電量通常用 q 代表，電量通常是時間的函數，因此流通的淨電量記為 $q(t)$ 。

電流（current） $i(t)$ 定義為電量的流率。即

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

圖 1-9



電流的單位是 C/S (庫侖 / 秒)，又記為安培 (ampere)，是紀念法國物理學家安培 (André Ampere, 1775-1836)。依據富蘭克林的定義 (他認為電流是正電荷流動引起的)，電流的方向是正電荷流動的方向。

理想電流源 (ideal current source) 見圖 1-10。這種裝置無論其兩端連接何種電路，一定會從端點 2 流入 I 安培，從端點 1 流出 I 安培的電

圖 1-10

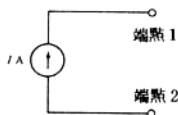
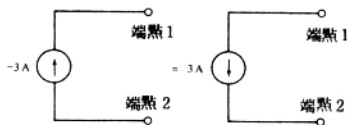


圖 1-11

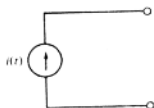


流 (如果圖中的箭頭方向相反，電流方向就相反)。由以上的定義，可以了解，圖 1-11 中的兩個理想電流源完全等效。

6 第一章 基本元件和基本定律

同樣地，理想電流源所產生的電流，一般來說也是時間的函數。因此，理想電流源的一般表法如圖 1-12，其單位為安培。

圖 1-12



習題 1-1 某理想電壓源 $v(t) = 10e^{-t}V$ ，則時間分別為(a) $t = 0$ 秒，(b) $t = 1$ 秒，(c) $t = 2$ 秒，(d) $t = 3$ 秒，(e) $t = 4$ 秒時，電源的電壓值為何？

答：(a) 10 V, (c) 1.35 V, (e) 0.183 V

1-2 若 $v(t) = 5 \sin(\pi/2)tV$ ，重作上題。

1-3 若 $v(t) = 3 \cos(\pi/2)tV$ ，重作上題。

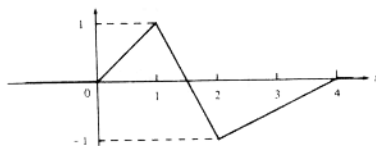
1-4 某材料其上的淨電量 $q(t) = 4e^{-2t}C$ ，則通過此材料的電流為何？

答： $-8e^{-2t}A$

1-5 若 $q(t) = 3 \sin \pi t C$ ，重作上題。

1-6 若 $q(t) = 6 \cos 2\pi t C$ ，重作上題。

圖 P1-7



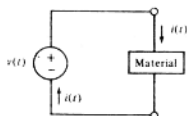
1-7 若 $v(t)$ 如圖 P1-7，重做習題 1-1。

1-8 某材料其上的淨電量 $q(t)$ 如圖 P1-7，試畫出通過此材料的電流 $i(t)$ 波形。

1-2 電阻和歐姆定律

若某種材料的兩端接上理想電壓源 $v(t)$ 。如圖 1-13，且 $v(t)$ 的波形如圖 1-8。因此當 $t = 0$ 秒時， $v(t) = 1V$ ，亦即材料頂端的電位較底端

圖 1-13



高 1V。因此材料內部的電子會從底端流到頂端，也就是電流從頂端流向底端。此時 $v(t)$ 為正值， $i(t)$ 亦為正值，亦即電流如圖示的方向。當 $t = 1$ 秒時， $v(t) = 2V$ ，材料頂端的電位仍高於底端，所以 $i(t)$ 仍為正值，但因電位差是 $t = 0$ 秒時的兩倍，所以 $t = 1$ 秒時的電流比 $t = 0$ 秒時大（若此材料為“線性”元件，則電流也將增為兩倍）。當 $t = 2$ 秒時， $v(t) = 0V$ ，亦即材料頂端的電位和底端相同，結果電子不會流動，不會產生電流， $i(t) = 0$ 。當 $t = 3$ 秒時， $v(t) = -2V$ ，亦即材料頂端的電位低於底端，因此造成由底端流向頂端的電流，此時 $i(t)$ 為負值。注意到電流 $i(t)$ 也流過電壓源，因為電流完全沒有其他的分路。

在圖 1-13 中，如果所產生的電流 $i(t)$ 和電壓 $v(t)$ 成正比，則此材料稱為線性電阻（linear resistor），或簡稱為電阻（resistor）。

電阻的電壓和電流成正比，故存在比例常數 R ，稱為電阻（resistance）。

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

等式兩邊分別除以 $i(t)$ ，得

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

電阻的單位是伏特 / 安培，亦稱為歐姆（ohm）*，通常以希臘字母 Ω 表之。電阻的電路示意符號見圖 1-14，單位為歐姆。（線性）電阻的電壓對電流曲線見圖 1-15。

非線性電阻的例子如電燈泡，其電壓對電流的典型曲線見圖 1-16。像這種元件雖然有非線性的特性，但工作時如果電壓（或電流）的變動不

* 這是紀念德國的物理學家歐姆（Geog Ohm, 1787 - 1854）。