

國家科學叢書

# 基本線性電路分析

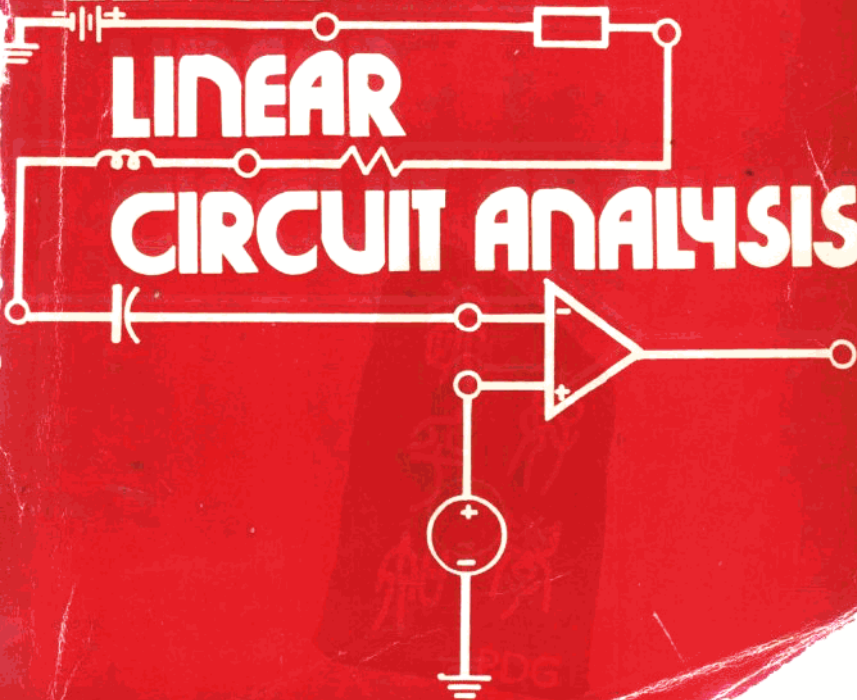
Leonard S. Bobrow 著

煙淦 譯

ELEMENTARY

LINEAR

CIRCUIT ANALYSIS



ELEMENTARY LINEAR  
CIRCUIT ANALYSIS

# 基本線性電路分析

原著者：*LEONARD S. BOBROW*  
譯者：煙淦

## ■ 基本線性電路分析

定價：新台幣叁佰伍拾元整

---

原著者：Leonard S. Bobrow

譯者：煙淦

總策劃：林洋慈

發行人：林大坤

發行所：國家出版社

總經銷：國家書店有限公司

郵撥：104801帳戶

總公司：台北市新生南路一段126之8號3樓

電話：3926748・3926749

門市部：台北市信義路二段128號

電話：3912425

印刷所：東遠印刷廠

---

1983年12月初版

行政院新聞局局版台業字第零陸叁貳號

## 原 序

這本教科書是專門為研究電路與系統的大二學生所做的。在我想，前七章的教材與附錄已經足夠做為一學期的課程所須，而後五章則可做為第二學期的課程；也許，有些學生能以較快的速度完成最後的一或二章。同樣地，在學季制的學校也能以三個學季來完成它的。

本書從傳統的概念開始討論，一如：電壓（Voltage）、電流（Current）、源（Source）、電阻（Resistor）和歐姆定律，我們咸信讀者早在高中或大一的課程中就已有了電和磁的物理觀念，如電荷、電位和磁場，程度較高的學生自然能理解，而不需要額外的定理則來詮釋；再者，我們也相信讀者同樣修過一或兩門專門討論微分和積分的基本微積分課程。

今天，大多數的學生也已經熟悉了矩陣符號，矩陣數學，而且也經由所學習的課程了解到如何應用克雷墨法則（Cramer's rule），附錄中的矩陣和  $\det$  (determinants) 只是做為一個複習，也許尚有一些學校的學生尚不熟悉它，在研讀第二章之前或其間，讀者就應詳讀附錄，仔細考慮電路的分析技巧。

專心在研究網路拓撲學，還不如就本書所寫的順序推導各種拓撲概念來做電路分析為理想。

許多有關電路的教科書都忽略了非弦式信號和波形的重要，而到稍後才提到或是根本就忽略它，在本書，主要研究的部份是電感器和電容器的應用，同時也提到了日益重要的運算放大器，OP 放大器將會時常出現在最後的幾章中。

一階和二階電路的範圍，傳統上是解決有常數係數的微分方程式的工具

，用微分方程式來描繪電路的特性，可擴展到使用書中的矩陣公式作為狀態變數分析的工具，因此可經由數位計算機求得數值解。

由時域轉換到頻域是常用來處理弦式分析，所得的結果用於隨後幾章在功率的應用上，而大都使用了複頻的記號，弦式記號愈來愈廣泛地應用於傅立葉級數以及更多其他方面如傅立葉轉換，而它不能適用的範圍也可以拉普拉斯轉換完成。

本書是以循序並進地增加其困難性。第一類學生幾乎是單純的，而第二類學生也已具備了它們所欠缺的經驗，其間是不同的。

在我的想法中，一本教科書須包括許多例題，而這些例題也須詳盡解說以便讀者能從頭至尾澈底明瞭，我想作者如說出：我能證明如下…那是不明智的，也許我自己能證明它，但讀者並不；在這種情形下，如我不能詳盡證明給讀者看，那麼這效果就不盡然完全了。當然，有些存在著有實際的理由，我並不打算正式地證明一些較艱深的問題。

吾人往往不會由一般性的觀點來處理一個主題，取而代之的是由一個例題，當學生瞭解了它，就會更進一步去觀察新的東西；當然，這是須要的，但是也需在學生看過之後；看詳解的例題常會啟發讀者某些解題程序，使他們能更簡單的領悟一些概念，在許多同類書中主要即以新材料吸收，而設法取得第一手資料，這僅是在教授上取勝罷！

在學習過程中非常重要的一點是解題，即使學生能在解答中一行行地看懂，但是這並不意味他能解題，為使他們獲得自信與洞察力，讀者必須完成每一習題，在本書中，有許多家庭作業，並不僅在每章結尾處，而且也出現在每節完結處。更且，除此之外還有其他題目，在題目中，有些被標上星號的是意味著答案已附有的，而所有問題的解答也收錄在解答手冊中，一些題目的取值也刻意模倣真實的情況。但是，本書是主要強調電路分析的概念而非數值上的計算，所以大多數題目也被造成簡單的數值。

本書的寫法與其他的書有些不同，但是原則上仍相同的，我認為能寫成讓讀者感到適合那是非常重要的。

Leonard S. Bobrow

## 目 錄

原序.....	1
<b>第一章 基本元件與定理.....</b>	<b>1</b>
1.1 理想源.....	1
1.2 電阻與歐姆定理.....	8
1.3 克希荷夫定理.....	21
1.4 相依源.....	54
1.5 功率.....	65
<b>第二章 電路分析技巧.....</b>	<b>77</b>
2.1 節點分析法.....	78
2.2 網目分析法.....	103
2.3 迴路分析法.....	122
<b>第三章 重要電路概念.....</b>	<b>135</b>
3.1 非理想源.....	135
3.2 最大功率傳輸.....	143
3.3 戴維寧定理.....	145
3.4 重疊原理.....	165
3.5 運算放大器.....	175

<b>第四章 儲能原件</b> .....	193
4.1 電感器.....	193
4.2 電容器.....	200
4.3 斜波、步級與脈衝.....	210
4.4 積分關係.....	227
4.5 串聯與並聯.....	242
4.6 網目和節點分析法.....	245
4.7 雙向性.....	248
4.8 線性化與重疊性.....	251
<b>第五章 一階電路</b> .....	263
5.1 零輸入響應.....	263
5.2 零狀態響應.....	283
5.3 非時變.....	290
5.4 強迫與自然響應.....	293
5.5 線性化和重疊性.....	304
5.6 其他強迫函數.....	313
5.7 其他一階電路.....	321
<b>第六章 二階電路</b> .....	333
6.1 串聯 $RLC$ 電路.....	333
6.2 並聯 $RLC$ 電路.....	341
6.3 串-並聯 $RLC$ 電路.....	348
6.4 非零輸入電路.....	354
<b>第七章 狀態變數分析法</b> .....	371

7.1 零輸入電路	371
7.2 狀態方程的數值解表	381
7.3 非零輸入電路	391
7.4 高狀態方程式的規則	405
<b>第八章 弦波分析</b>	<b>417</b>
8.1 時域分析	417
8.2 複數	427
8.3 頻域分析	429
<b>第九章 功率</b>	<b>465</b>
9.1 平均功率	465
9.2 有效值	477
9.3 複數功率	485
9.4 單相、三線系統	494
9.5 三相電路	498
9.6 功率測量	509
<b>第十章 重要的交流觀念</b>	<b>519</b>
10.1 頻率響應	519
10.2 諧振	526
10.3 定比	547
10.4 複頻	553
10.5 頻率響應的圖形決定	568
<b>第十一章 雙埠網路</b>	<b>577</b>
11.1 變壓器	577



11.2 理想變壓器	590
11.3 雙埠的導納參數	602
11.4 其他的雙埠參數	614
<b>第十二章 傅立葉級數</b>	<b>629</b>
12.1 三角的傅立葉級數	630
12.2 複數的傅立葉級數	662
<b>第十三章 傅立葉變換</b>	<b>671</b>
13.1 傅立葉積分	672
13.2 一些重要函數的變換	676
13.3 傅立葉變換的應用	696
13.4 電路的應用	704
<b>第十四章 拉氏變換</b>	<b>725</b>
14.1 拉氏變換的性質	725
14.2 部份分式展開式	738
14.3 線性系統的應用	751
14.4 網路分析	763
<b>附錄- 矩陣與行列式</b>	<b>784</b>
<b>索引</b>	<b>803</b>

# 第一章 基本原件與定理

## BASIC ELEMENTS AND LAWS

### 導論 (Introduction)

在電機電子工程教育中，電路的研討是基本而必須的。而且是相當有價值的訓練。這種技巧的獲得，不僅在電機工程的領域內相當有用，尚可應用到電子學 (Electronics)、通訊 (Communications)、微波 (Microwaves)、控制系統 (Controls) 以及功率系統 (Power System) 中。而且也可推展到其他類似的工程上。

所謂電路 (Electric Circuit) 或網路 (Network)，意指一些電子元件的組合。這些電子元件如：電壓源 (Voltage Sources)、電流源 (Current sources)、電阻器 (Resistors)、電感器 (Inductors)、電容器 (Capacitors)、變壓器 (Transformers)、放大器 (Amplifiers) 和電晶體 (Transistors) 等等。各種電路的應用雖然是重要的，但是並不是我們討論的主題。實際上我們所關心的是如何去處理和研判電路的行為。也就是所謂的分析 (Analysis)。

我們剛開始，先考慮一些基本電路元件和定理，同時陳述他們。我們相信讀者在高中或大學時，已經培植了電荷 (Charge)、電位 (Potential) 和電流 (Current) 的各種觀念。

### 1-1 理想源 (Ideal Sources)

電荷的單位是庫倫 (Coulombs) 縮寫成 C，是爲了紀念一位法國科學家 Charles de Coulombs (1736 - 1806)。而功或能的單位是焦耳 (Joule) 也是以英國的物理學家 James P. Joule (1818 - 1889) 爲名的

的。雖然能量消耗於電荷上的單位為  $J/C$ ，但是我們通常稱之為伏特(Volt)，是為了紀念義大利的物理學家 Alessandro Volta (1745—1827)。我們一般稱之為電位差 (Electric Potential difference) 或是電壓 (Voltage)。

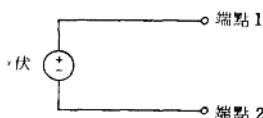


圖 1.1

一理想電壓源和圖 1-1 所示。它是一個不論二端點所接負載為何，而能固定產生  $V$  伏特的電壓或電位差的裝置。

對於圖 1-1 所示的元件，端點 1 上標有正 (+) 字記號，而端點 2 被標有負 (-) 字記號。這代表的是端點 1 在電位上是  $V$  伏特高於端點 2 的電位 (相同的，端點 2 在電位上是  $V$  伏特低於端點 1 的電位)。

$V$  量的大小可為正或負，在稍後的例子中，我們即可由下面的例題中，獲得一對等效數值的電壓源。

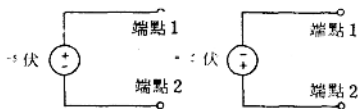


圖 1.2

假設  $v = -5$  伏特，也就是端點 1 的電位高於端點 2 的電位  $-5$  伏特。然而，這完全等效於端點 1 的電位低於端點 2 的電位  $+5$  伏特。因此，在圖 1-2 所示的二理想電壓源是等效的。

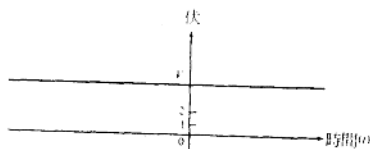


圖 1.3

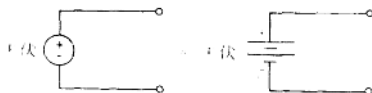


圖 1.4

如上面所述的，我們可以說理想的電壓源之值是常數。也就是說：它並不隨時間而變化的。就如圖 1-3 所繪。在這種情形下，理想電壓源也被表示成圖 1-4。我們稱之為理想電池組 (Ideal Battery)。

雖然實際上，電池組並不是很理想的，但是在許多環境下，理想電池組是非常近似於理想。就像手提晶體收音機所用的九伏特電池，或者是使用四個或六個 "C" 型或者是 D 型  $1\frac{1}{2}$  伏特的電池。我們將於第三章再廣泛地討論實際和實用性的電壓源。

一般來說，雖然電壓源所產生的電壓，將會是時間的函數。如同圖 1-5 所示：一些典型的電壓波形，在 "a" 和 "b" 所示的是典型的調幅 (AM-Amplitude Modulation) 和調頻 (FM-Frequency Modulation) 信號。兩種信號都是使用於營業用收音機通訊上。"c" 所示的弦示波形有廣

#### 4 基本線性電路分析

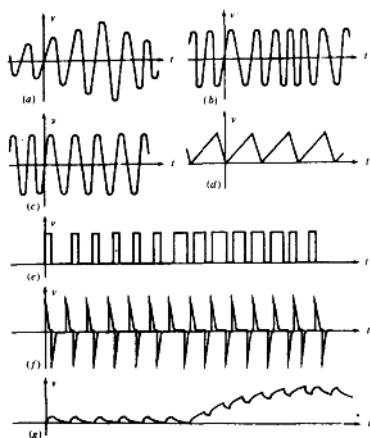


圖 1.5

泛地使用。例如：在家庭用電上，這種波形的頻率通常用來做為一參考信號。就如二電視機的彩色偵測信號。“d”所表示的是一鋸齒波（Sawtooth），通常用於電視或示波器上，電子射束的掃描信號，“e”所表示的是脈波列（Pulse Train），通常用在視頻（Video）信號的水平與垂直同步信號。而“f”和“g”是由“e”所衍生而來的，前者是用來同步水平振盪器（Oscillator），而後者是用來同步垂直振盪器。

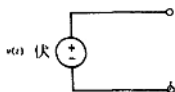


圖 1.6

因為電壓源通常是時間的函數，我們稱之  $v(t)$ 。在大部分情況之下，我們用圖 1-6 來表示一個理想電壓源。

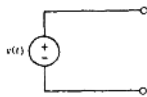


圖 1.7

即使單位“伏特”並沒有包括在表示一電源時，也不會發生混淆。因此，在圖 1-7 中，所表示的理想電壓源完全同於前者圖 1-6。有加上伏特的電壓源，為了說明起見，圖 1-7 所示的理想電壓源  $v(t)$  被描繪成圖 1-8，這兒等效於圖 1-9 所示於特定時間下的電壓值。例如：在  $t = 1$  秒時，電壓源就如同一個二伏特的理想電池。

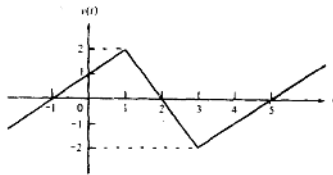


圖 1.8

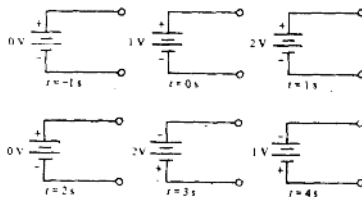


圖 1.9

在電路上有電位差發生時，就會有電荷的流動。負電荷在實際上即為電子，是流向電位較高的地方。相對的，正電荷即是向電位較低之處而流。電荷大都以  $q$  表示。這大小通常都是時依 (Time Dependent) 流動電荷之總量，稱為  $q(t)$ 。

我們將電流 (Current) 定義為  $i(t)$ 。因為電荷的流率 (Flow rate)，也就是  $i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$ 。

電流的單位 (每秒庫倫 C/s) 為安培 (Amperes)，簡寫成 A。是為紀念法國物理學家 Andre Ampere (1775—1836)。又由於 Benjamin Franklin (一個偉大的理想家) 使得電流的方向被定成為正電荷流動的方向。

一個理想的電流源 (圖 1-10)，是一個元件。不論連接任何東西，總是推 I 安培離開端點 1，而從端點 2 拉 I 安培電流 (相對的，假如箭頭是相反的方向)。這種定義的結果。使得在圖 1-11 中，二個理想電流源等效的觀念非常清晰。

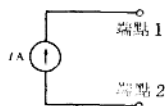


圖 1.10

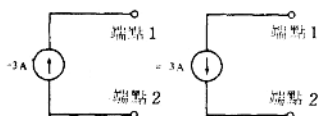


圖 1.11

而且，一般來說，理想電流源所發生的電流也是時間的函數。因此，一般理想電流的表示符號就示標圖1-12，而其單位為安培 (Amperes)。

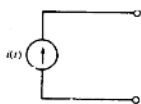


圖 1.12

## 問題

•1-1 一個理想電壓源的大小是  $v(t) = 10e^{-t}$  V，在時間 (a)  $t = 0$  s, (b)  $t = 1$  s, (c)  $t = 2$  s, (d)  $t = 3$  s, (e)  $t = 4$  s 時，電壓源其值的大小為何？

答案：(a) 10V, (c) 1.35V, (e) 0.183V, (b) 13.68V, (d) 0.498V

1-2 假如  $v(t) = 5 \sin(\pi/2)t$  V。重覆問題 1-1。答案(a) 0V, (b) 5V, (c) 0 V, (d) -5V, (e) 0 V。

1-3 假如  $v(t) = 3 \cos(\pi/2)t$  V。重覆問題 1-1。答案(a) 3V, (b) 0V, (c) -3V, (d) 0V, (e) 3V。

1-4 在某種材料中，總電荷是  $q(t) = 4e^{-2t}$  C。求出這材料所通過的電流。

答案：  $-8e^{-2t}$  A

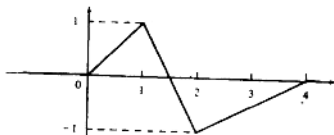


圖 P1.7



1-5 重覆問題 1-4 假使  $q(t) = 3\sin \pi t$  C。

1-6 假如  $q(t) = 6\cos 2\pi t$  C 重覆問題 1-4。

1-7 假如  $v(t)$  的大小如圖 P1.7 函數，重覆問題 1-1 所求。

1-8 在某種材料，總電荷  $q(t)$  大小如圖 P 1-7 所示之值，描繪出材料上電流  $i(t)$  的圖形。

### 1-2 電阻與歐姆定理 (*Resistors and Ohm's Law*)

假設某種材料的元件連接在一理想電壓源  $v(t)$  端點上就如 1.13 所示，而且  $v(t)$  波形如圖 1.8 所示，那麼在時間  $t = 0$  時  $v(t) = 1V$ ，因此這個元件頂端的電位較末端的電位高出  $1V$ ，在元件中的電子，將會由元件的底端流向頂端，我們也稱電流是由元件的頂端流向底端。故：對所給予的極性而言，當  $v(t)$  為正數時，而  $i(t)$  將會也為正數方向如圖所指，同樣地在  $t = 1s$ ， $v(t) = 2V$  頂端的電位一樣大於底端的電位， $i(t)$  再次為正值，由於在  $t = 1s$  時電位為  $t = 0s$  的二倍，所以在  $t = 1s$  的電流將會較  $t = 0s$  時為大（如果材料為線性（linear）元件，電流為二倍之多），又在  $t = 2s$  時  $v(t) = 0V$ ，因此元件的頂端與底端是同電位，結果造成電子不流動，因此設電流  $i(t) = 0$  在  $t = 3s$  時  $v(t) = -2V$ ，因此，在元件頂端的電位低於底端，結果，電流由底端流向頂端，而  $i(t)$  呈顯負值，須注意的是電流流經元件，同樣流經電壓源。

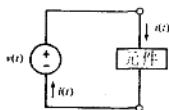


圖 1.13

假如在圖 1.13 中，電流  $i(t)$  直接與電壓成正比，不論任何函數波