

(上册)

工程電路分析

張智星 李景譯 譯

Fourth Edition

Engineering Circuit Analysis

William H. Hayt, Jr. Jack E. Kemmerly

工程電路分析

(上册)

張智星 李景譯 譯

儒林圖書公司 印行

版權所有
翻印必究

工程電路分析(上冊)

譯者：張智星

發行人：楊鏡秋

出版者：儒林圖書有限公司

地址：台北市重慶南路一段111號

電話：3118971-3 3144000

郵政劃撥：0106792-1號

吉豐印刷廠有限公司承印

板橋市三民路二段正隆巷46弄7號

行政院新聞局局版台業字第1492號

中華民國七十六年五月初版

定價新台幣 230 元正

序 言

本書屬於電機工程的基礎課程。在許多學院及大學中，本課程的開授，須以物理學（其中多以場（field）的觀點，來介紹電學及磁學）為預修課程或同修課程，然而此非必要的，因為本書的第一章中，已經詳細敘述所有電學及磁學的必備概念。然而研讀本書所需的預修（或同修）課程，即初級微積分。本書所介紹的電路元件（circuit element），均以電路方程式來定義，也會略提到相關的電場或磁場。

作者編寫本書的動機，是要使學生能以自修方式來研讀本書。也就是說，本書是專為學生所寫。因此，在編排上，如有新名詞出現時，就儘可能地給予清晰完整的定義。每一章都會先詳細介紹基本概念，再以實際的例子，引進（或暗示）一般性的結論。在每一節中，都附有簡單的練習題和解答，使得讀者更能掌握該節的重點；而每章最後面，也都附有較深入的問題；這些問題偶爾用來介紹較不重要的課題，由漸進的引導，使讀者明瞭更深一層的觀念。這種「介紹概念」及「演練習題」的兩大步驟，是學習過程中不可偏廢的兩大重點。總計本書共有 220 個練習題（每一題又分為數個部份）和 597 個課後問題，在本版中，這些問題都是新編的。

本書各種題材的編排，能使讀者能從最簡單的課文中，獲得許多有關電路分析的技巧。第一部份的主題是電阻性電路（resistive circuit），所介紹的基本定律、定理及電路型態，可使讀者熟悉基本的分析技巧，這些基本技巧亦可推廣應用於較複雜的電路（見後面各部份），達到以簡御繁的經濟原則。所涉及的數學也都很簡單，例題及習題也很容易。完全依學生

的資質與能力，及課程安排而定，這部份授課時數約在四至六週內。

第二部份談到自然響應 (natural response)，簡單的RL、RC及RLC電路在直流激發下，所產生的完全響應 (complete response)。這一部份就需要微分及積分的概念，但還不需要用到微分方程。本部份也介紹了屬於奇異函數 (singularity function) 的單位步級函數 (unit step function)，但單位脈衝函數 (unit impulse function) 却要在轉換技巧 (transform techniques) (第十八章) 介紹之後，才會正式談到。

第三部份引入頻域 (frequency domain) 的觀念，以及利用複數的運算來進行穩態 (steady state) 下的正弦分析 (sinusoidal analysis)。本部份亦包括了平均功率、均方根值 (rms values) 及多相電路 (polyphase circuit) 的介紹，這些題材都牽涉到正弦穩態 (sinusoidal steady state)。

在下冊第四部份介紹了複頻 (complex-frequency) 的觀念，並強調此觀念和強制響應 (forced response) 及自然響應之間的關係。要決定正弦激發電路所產生的完全響應，必須對前三部份的內容全盤了解。

下冊第五部份首先介紹磁耦合 (magnetic coupling)，基本上這是一種雙埠現象 (two-port phenomenon)。然後再考慮雙埠網路的分析，與各種電子裝置的線性模型化。

下冊第六部份介紹更為有效的網路分析技巧，其中之一，就是以傅立葉級數 (Fourier series) 來描述週期波形。此過程亦可藉由傅立葉轉換 (Fourier transform)，而延伸至非週期性的激勵及響應函數 (forcing and response function)。此部份的最後一章包含了更重要的拉卜拉斯變換 (Laplace transform) 技巧，並可用此方法求出複雜電路的完全響應。

以兩學期的時間要授完本書全部內容，份量似乎太多了，因此可由最後的四或五章，選擇部份題材來教授即可。在本書中，所有題材都具有某種程度的重要性，因此，訊號流程圖 (signal-flow graphs)、電路理論和場理論的關係、高級拓樸 (topology) 概念、狀態變數 (state-variable) 技巧及計算機輔助分析 (computer-aided analysis) 等題材，都可作為本課程之後的銜接課程。

本版有許多改變，最明顯的是色彩的運用，不但可以強調課文重點，更加强了插圖的對比和清晰度。運算放大器 (operational amplifier) 是今

日最重要的電子裝置，因此本書特別詳加介紹，並提供了含有相依電源 (dependent sources) 之電路的例子：如電壓追隨器 (voltage follower)、積分器及微分器 (integrator and differentiator)、乘法器 (multiplier)、反相放大器 (inverting amplifier) 以及可模擬“無損耗 LC 電路” (lossless LC circuit) 及電壓增益轉移函數 (voltage-gain transfer functions) 的電路。

在上冊第三章中，先介紹電源轉換 (source transformations)，再介紹戴維寧及諾頓定理 (Thévenin and Norton theorems)，使讀者能由淺至深了解此題材。複功率 (complex power) 在本版是以標準符號 S 來代表。此外，利用瓦特計 (wattmeter) 來測量三相 (three-phase) 功率的特殊方法，已從本版刪除。

在下冊第十三章中，詳細地陳述了轉移函數 (transfer function) 的極點 (poles) 和暫態響應 (transient response) 的關係，而在其後各章中，並聯及串聯共振 (parallel and series resonance) 被摘錄整理成表格的型式。第十四章中，多加了新的一節，主要在介紹波德圖形 (Bode diagram)。第十六章在內容方面改善很多，主要有下列幾點：一、包含了以綜合行列式 (generalized determinants) 所表示的輸入導納 (input admittance)；二、利用矩陣記號表示雙埠參數，並加上附錄，說明矩陣的基本性質；三、仔細探索雙埠的串聯、並聯及串級 (cascade) 接法；四、附加一節，專門討論傳輸參數 (transmission parameters)；五、附加一表格，扼要說明了所研讀的四組參數之間的關係。

狀態變數因使用不普遍，相關的章節也在本版中刪除。

在下冊十八章中，多加一個“迴旋” (convolution) 的例子，用以強調圖形技巧的運用。此外，特別定義單邊 (one-sided) 拉卜拉斯轉換的積分下限，是從 $t = 0^-$ 開始。數種計算“部份分式展開式” (partial-fraction expansions) 的方法，也在本章中介紹。

附錄五是單數問題的解答，而我們也準備了解答手冊提供給每位教師。相信這對學生和老師裨益良多。

本書所有題材的編排，從定義開始，經過解釋、敘述、圖示、實例，以至於解題能力，每個過程都有邏輯脈絡可尋。作者最大的期望，就是希

望學生們能不斷地反問自己“爲什麼這會發生？和上星期的作業有何關聯？下一步應如何推敲？”一位初爲工科學生的新鮮人，必定滿懷熱情與壯志，但唯有吸收、了解、整合由各章節所吸收的觀念；並進而了解各種未來的應用和高級的技巧，再加上保持好奇、好問的學習態度，才能在各種問題中求得正確答案，以肯定自己的進步，繼續在課業的學習上，保持旺盛向上的求知心。

如果在本書中某些部份顯得不夠嚴肅，甚至顯得輕鬆愉快，是因爲作者覺得：要達到教育的目的，並不一定要使課文看來枯燥無味或華而不實；如果在課文的編寫上，有其幽默有趣的一面，那麼讀者在研讀時，也會感到無比的輕鬆愉快。

本書大部份的題材，是根據加州州立大學(California State University，在Fullerton)、福特路易斯學院(Fort Lewis College，在Durango，Colorado)及普渡大學(Purdue University)所開的課程所編寫。

William H. Hayt, Jr.

Jack E. Kemmerly

積分簡表

$$\int \sin^2 ax \, dx = \frac{x}{2} - \frac{\sin 2ax}{4a}$$

$$\int \cos^2 ax \, dx = \frac{x}{2} + \frac{\sin 2ax}{4a}$$

$$\int x \sin ax \, dx = \frac{1}{a^2} (\sin ax - ax \cos ax)$$

$$\int x^2 \sin ax \, dx = \frac{1}{a^3} (2ax \sin ax + 2 \cos ax - a^2 x^2 \cos ax)$$

$$\int x \cos ax \, dx = \frac{1}{a^2} (\cos ax + ax \sin ax)$$

$$\int x^2 \cos ax \, dx = \frac{1}{a^3} (2ax \cos ax - 2 \sin ax + a^2 x^2 \sin ax)$$

$$\int \sin ax \sin bx \, dx = \frac{\sin(a-b)x}{2(a-b)} - \frac{\sin(a+b)x}{2(a+b)}; a^2 \neq b^2$$

$$\int \sin ax \cos bx \, dx = -\frac{\cos(a-b)x}{2(a-b)} - \frac{\cos(a+b)x}{2(a+b)}; a^2 \neq b^2$$

$$\int \cos ax \cos bx \, dx = \frac{\sin(a-b)x}{2(a-b)} + \frac{\sin(a+b)x}{2(a+b)}; a^2 \neq b^2$$

$$\int x e^{ax} \, dx = \frac{e^{ax}}{a^2} (ax - 1)$$

$$\int x^2 e^{ax} \, dx = \frac{e^{ax}}{a^3} (a^2 x^2 - 2ax + 2)$$

$$\int e^{ax} \sin bx \, dx = \frac{e^{ax}}{a^2 + b^2} (a \sin bx - b \cos bx)$$

$$\int e^{ax} \cos bx \, dx = \frac{e^{ax}}{a^2 + b^2} (a \cos bx + b \sin bx)$$

$$\int \frac{dx}{a^2 + x^2} = \frac{1}{a} \tan^{-1} \frac{x}{a}$$

$$\int_0^{\infty} \frac{\sin ax}{x} dx = \begin{cases} \frac{1}{2}\pi; & a > 0 \\ 0; & a = 0 \\ -\frac{1}{2}\pi; & a < 0 \end{cases}$$

$$\int_0^{\pi} \sin^2 ax dx = \int_0^{\pi} \cos^2 ax dx = \frac{\pi}{2}$$

$$\int_0^{\pi} \sin mx \sin nx dx = \int_0^{\pi} \cos mx \cos nx dx = 0; \quad m \neq n, \quad m, n \text{ 均爲整數}$$

$$\int_0^{\pi} \sin mx \cos nx dx = \begin{cases} 0; & m+n \text{ 是偶數} \\ \frac{2m}{m^2 - n^2}; & m+n \text{ 是奇數} \end{cases}$$

三角恆等式簡表

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta$$

$$\cos(\alpha \pm 90^\circ) = \mp \sin \alpha$$

$$\sin(\alpha \pm 90^\circ) = \pm \cos \alpha$$

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta)$$

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) - \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta)$$

$$\sin \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \sin(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \sin(\alpha - \beta)$$

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha$$

$$\cos 2\alpha = 2 \cos^2 \alpha - 1 = 1 - 2 \sin^2 \alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha$$

$$\sin^2 \alpha = \frac{1}{2} (1 - \cos 2\alpha)$$

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{2} (1 + \cos 2\alpha)$$

$$\sin \alpha = \frac{e^{j\alpha} - e^{-j\alpha}}{j2}$$

$$\cos \alpha = \frac{e^{j\alpha} + e^{-j\alpha}}{2}$$

$$e^{\pm j\alpha} = \cos \alpha \pm j \sin \alpha$$

$$A \cos \alpha + B \sin \alpha = \sqrt{A^2 + B^2} \cos \left(\alpha + \tan^{-1} \frac{-B}{A} \right)$$

目 錄

| | |
|-----------------|----|
| 序 言 | V |
| 第一部份 電阻性電路 | 1 |
| 第一章 定義與單位 | 3 |
| 1-1 簡 介 | 3 |
| 1-2 單位系統 | 4 |
| 1-3 電荷的單位 | 9 |
| 1-4 電 流 | 11 |
| 1-5 電 壓 | 16 |
| 1-6 功 率 | 18 |
| 1-7 電路及電路元件的種類 | 20 |
| 第二章 實驗定律和簡單電路 | 31 |
| 2-1 簡 介 | 31 |
| 2-2 歐姆定律 | 32 |
| 2-3 克希荷夫定律 | 35 |
| 2-4 單迴路電路的分析 | 41 |
| 2-5 單節點對電路 | 46 |
| 2-6 電阻及電源的合併 | 48 |
| 2-7 電壓分壓律及電流分流律 | 55 |
| 2-8 運算放大器 | 58 |

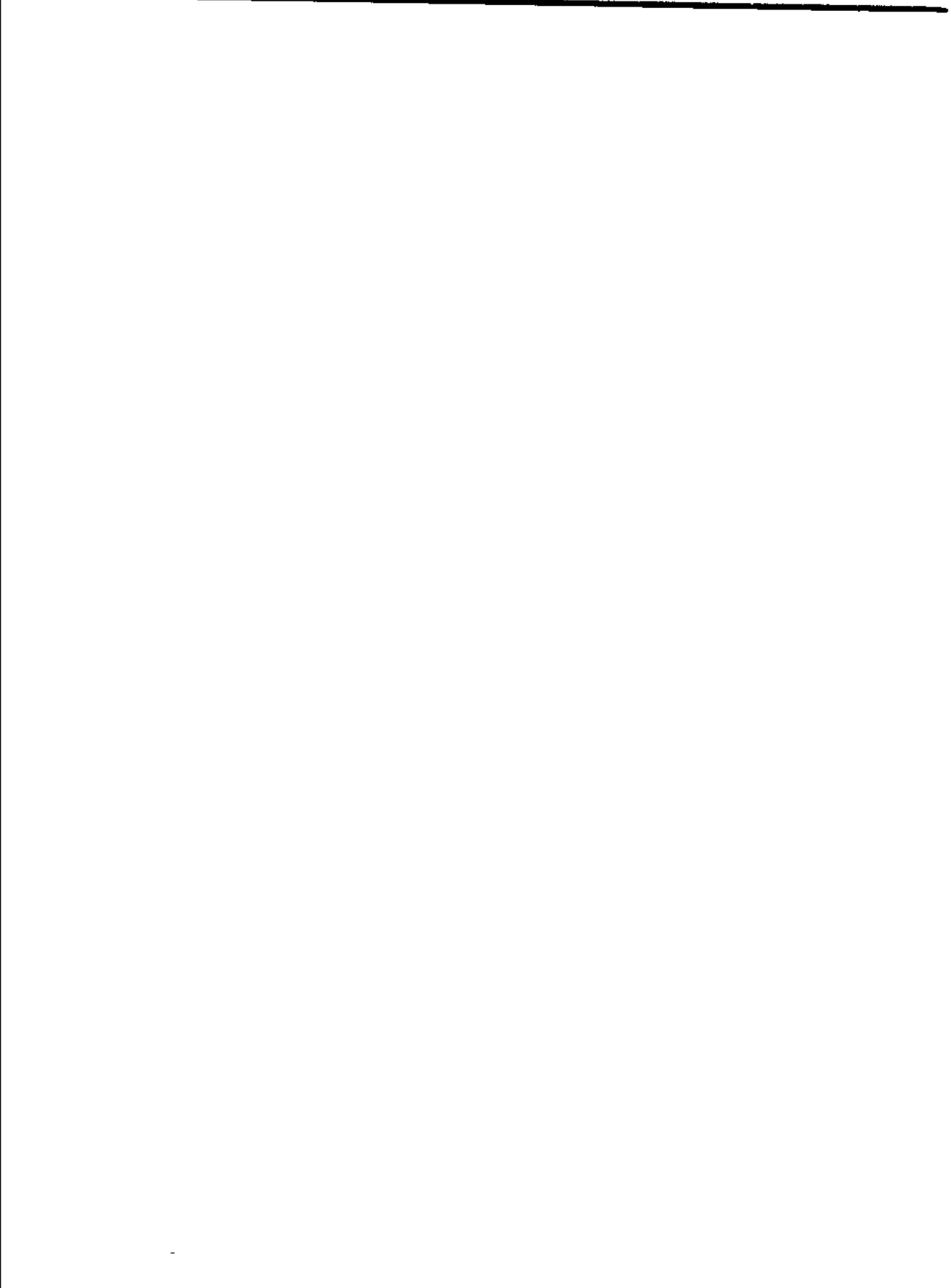
| | | |
|------|---------------------|-----|
| 第三章 | 分析電路的技巧 | 75 |
| 3-1 | 簡 介 | 75 |
| 3-2 | 節點分析 | 76 |
| 3-3 | 網目分析 | 87 |
| 3-4 | 線性與重疊 | 95 |
| 3-5 | 電源變換 | 100 |
| 3-6 | 戴維寧和諾頓定理 | 107 |
| 3-7 | 樹及綜合節點分析 | 117 |
| 3-8 | 鏈結及迴路分析 | 125 |
| 第二部份 | 暫 態 電 路 | 141 |
| 第四章 | 電感及電容 | 143 |
| 4-1 | 簡 介 | 143 |
| 4-2 | 電感器 | 144 |
| 4-3 | 電感器的積分關係式 | 148 |
| 4-4 | 電容器 | 154 |
| 4-5 | 電感及電容的合併 | 163 |
| 4-6 | 對偶性 | 169 |
| 4-7 | 再談線性的重要性 | 174 |
| 第五章 | 無電源的 RL 及 RC 電路 | 183 |
| 5-1 | 簡 介 | 183 |
| 5-2 | 簡單的 RL 電路 | 184 |
| 5-3 | 指數響應的性質 | 189 |
| 5-4 | 較一般化的 RL 電路 | 192 |
| 5-5 | 簡單的 RC 電路 | 196 |
| 5-6 | 較一般化的 RC 電路 | 199 |
| 第六章 | 單位步級激勵函數之應用 | 211 |
| 6-1 | 簡 介 | 211 |
| 6-2 | 單位步級激勵函數 | 212 |
| 6-3 | 初探被驅動的 RL 電路 | 217 |

| | | |
|------|-----------------------|-----|
| 6-4 | 自然響應及強制響應 | 220 |
| 6-5 | RL 電路 | 223 |
| 6-6 | RC 電路 | 229 |
| 第七章 | RLC 電路 | 241 |
| 7-1 | 簡 介 | 241 |
| 7-2 | 無電源的並聯電路 | 242 |
| 7-3 | 過阻尼的 RLC 並聯電路 | 247 |
| 7-4 | 臨界阻尼 | 252 |
| 7-5 | 欠阻尼的 RLC 並聯電路 | 256 |
| 7-6 | 無電源的 RLC 串聯電路 | 261 |
| 7-7 | RLC 電路的完全響應 | 265 |
| 7-8 | 無損耗的 LC 電路 | 272 |
| 第三部份 | 正 弦 分 析 | 285 |
| 第八章 | 正弦激勵函數 | 287 |
| 8-1 | 簡 介 | 287 |
| 8-2 | 正弦函數的特性 | 289 |
| 8-3 | 正弦激勵函數作用下的強制響應 | 292 |
| 第九章 | 相 量 概 念 | 301 |
| 9-1 | 簡 介 | 301 |
| 9-2 | 複激勵函數 | 302 |
| 9-3 | 相 量 | 307 |
| 9-4 | R 、 L 和 C 的相量關係 | 311 |
| 9-5 | 阻 抗 | 317 |
| 9-6 | 導 納 | 321 |
| 第十章 | 正弦穩態響應 | 329 |
| 10-1 | 簡 介 | 329 |
| 10-2 | 節點、網目和迴路分析 | 329 |
| 10-3 | 重疊原理、電源轉換及戴維寧定理 | 333 |
| 10-4 | 相量圖 | 335 |

| | |
|-------------------------|-----|
| 10-5 表為 ω 函數的響應 | 340 |
| 第十一章 平均功率與均方根值 | 353 |
| 11-1 簡 介 | 353 |
| 11-2 瞬間功率 | 354 |
| 11-3 平均功率 | 357 |
| 11-4 電流和電壓的有效值 | 367 |
| 11-5 外顯功率及功率因數 | 371 |
| 11-6 複功率 | 376 |
| 第十二章 多相電路 | 389 |
| 12-1 簡 介 | 389 |
| 12-2 單相三線系統 | 392 |
| 12-3 三相 Y - Y 連接 | 396 |
| 12-4 三角 (Δ) 連接 | 403 |
| 附錄一 行列式 | 413 |
| 附錄二 矩 陣 | 419 |
| 附錄三 戴維寧定理之證明 | 423 |
| 附錄四 複 數 | 427 |
| A 4-1 複 數 | 427 |
| A 4-2 尤拉恆等式 | 432 |
| A 4-3 指數形式 | 433 |
| A 4-4 極 式 | 437 |
| 附錄五 單數問題解答(上冊) | 441 |
| 中英名詞對照 | 449 |

第一部份

電阻性電路



第一章

定義與單位

1-1 簡 介

本章之目的，在於提供進入「工程電路分析」(engineering circuit analysis) 的最基本知識，但事實上，這些基本知識對於其他工程師以及物理學家、應用數學家等，都是不可或缺的，而且本章非常具有啓發性、挑戰性及實用性。未曾讀過本章的人也許會問：「何謂工程電路分析？」我們可由字典中詞句的涵義(如下)，來回答這個問題。

工程 (engineering)：研究物體性質或自然資源的科學。

電路 (circuit)：至少須包含一封閉路徑，以使電流通的簡單電機裝置。

分析 (analysis)：對複雜事物的數理研判，並找出其內部各部份的相互關係。

因此，「工程電路分析」即為「以數理方法來研究某些簡單電機裝置的連接(但至少須包含一可供電流通的封閉路徑)」。以下馬上就會介紹電流(current)及電機裝置(electrical devices)的定義。

不久之前，本類的教科書仍被視為完全屬於電機工程的教科書，然而時至今日，除了電機工程師之外，其餘各系所(如土木工程、機械工程等各工學院科系，以及應用數學、電腦科學、生物、物理系等)的學生，在研讀電路分析的介紹性書籍方面，也有越來越多的趨勢；除此之外，有些工

4 工程電路分析

科的學生，在尚未完全成爲某一特定系所的學生之前，即已研讀此類課程。

讀者若想要（或已經）進入電機工程的領域，則電路分析只不過是介紹性課程而已；若讀者並非主修電機工程者，則可將電路分析視爲電機工程的代表課程，並藉著對電路分析的學習，進一步了解電子學、儀器操作等其他相關知識。然而最重要的是：研讀本章之後，不但可以擴充新知，而且能使自己在一團體（致力於電機裝置或系統發展的組織）中，成爲精通資訊的人士。無論如何，在一團體中有效的溝通管道，還是要靠著共通的語言及熟悉的定義來達成。

近代的工程成就，很少是由一個人獨力完成所謂“愛迪生式”（Edison-type）的發明家，在今天已經不復存在，所以即將畢業的工科學生應該了解，個人只是屬於團體的一部份，然而此團體包含各類工程師（諸如應用數學家、電腦科學專家、物理學家等）。整個團體的配合及運作，都要由經過高度訓練的管理者來協調、完成，所製造及銷售的科技產品，也必須經由具有科學或工程經驗的人員來操作和維護。今日的工科畢業生，不啻要處理工程問題的設計層面及製造一個更好的雷達系統而已，更有甚者，他們亦致力於社會經濟問題的解決，如空氣和水污染、都市規劃、大眾運輸、新能源的開發、既有能源（特別是汽油及天然氣）的保持。爲了致力於解決這許多工程問題，故身爲一個優良的工程師就必須熟練許多技巧，電路分析就是其中一門必備知識。

首先，要介紹單位系統傳統的基本定義。對於已經具有基本電學及磁學知識的人，本章略讀即可。在介紹這些課題並且熟悉後，我們就可以專注於基本電路的研習。

1-2 單位系統

我們必須先建立一套共通的語言。假如缺乏清楚明白的語句，則工程師之間就無法達成有意義的溝通；同理，若一本書中的每個名詞都缺乏明確的定義，那麼欲從此書獲得新知相當困難。以電視上常見之廣告詞爲例：「使您的衣物比以往潔白 40%！」，若沒有定義「潔白」的單位或度量方法，那麼縱然能賣出大量的洗衣粉，但是以工程學的觀點上言仍然是難