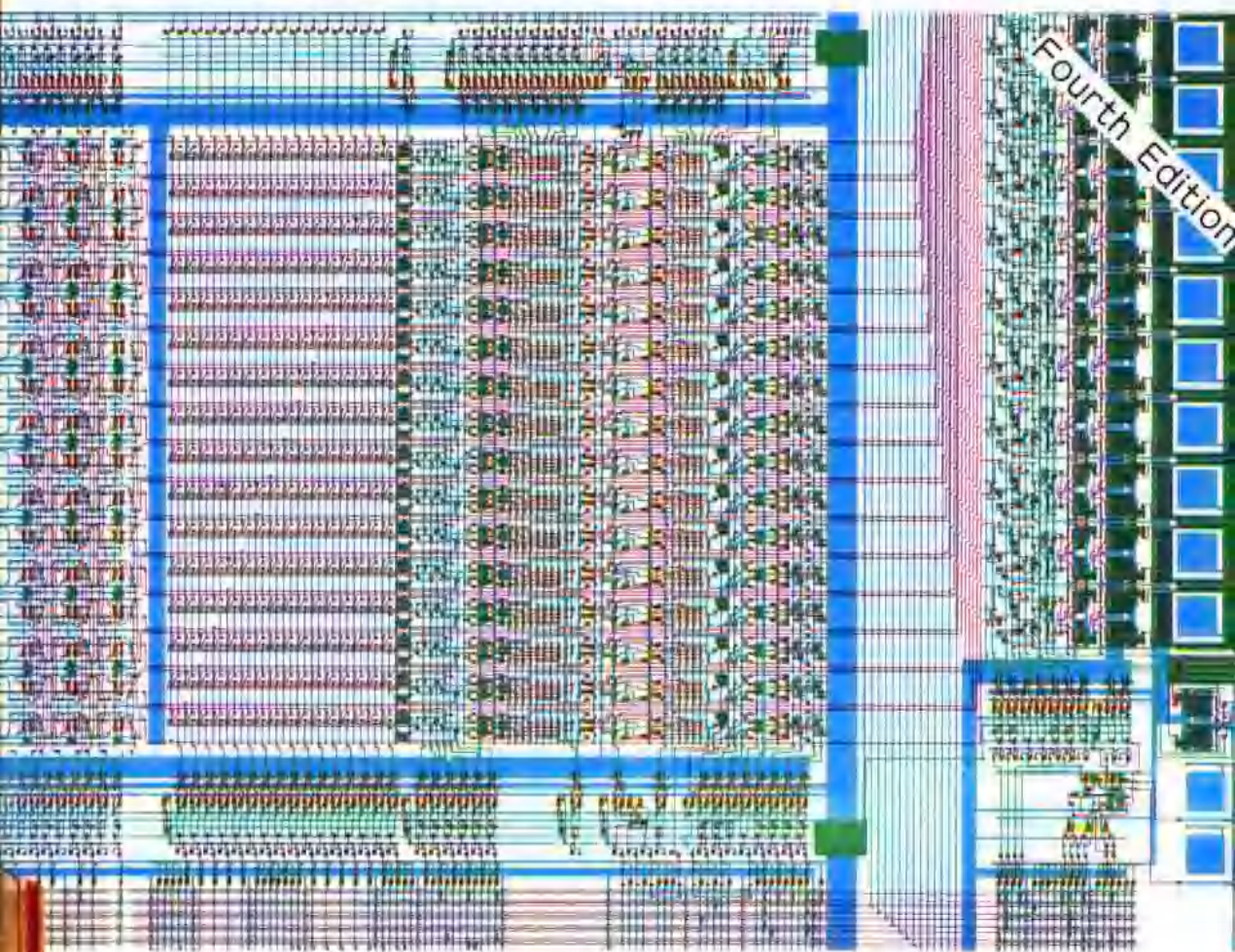


第四版

(下冊)

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

(下冊)

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(下冊)

譯者：張智星·李景譯

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

中華民國七十六年八月初版

定價新台幣 200 元正

4531

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，就盡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分）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），達到以簡馭繁的經濟原則。所涉及的數學也都很簡單，例題及習題也很容易。完全依學

HWT/12

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) 卻要在轉換技巧 (transform techniques) (第 18 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 (poly-phase 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轉換 (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、高級拓撲 (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，

更加強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“部分分式展開式” (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分顯得不夠嚴肅，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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Handwritten signature or mark

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

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

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

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

三角恆等式簡表

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



標準縮寫

| | | | |
|--------------------------------|--------------------|--|----------|
| 交流 (alternating current) | ac | 姆歐·西門 (mho, siemen) | Ω |
| 安培 (ampere) | A | 分 (minute) | min |
| 庫侖 (coulomb) | C | 納 (neper) | Np |
| 每秒週數 (cycle per second) | cps | 牛頓 (newton) | N |
| | (避免使用) | 牛頓 - 米 (newton-meter) | N·m |
| 分貝 (decibel) | dB | 歐姆 (ohm) | Ω |
| 攝氏度數 (degree Celsius) | $^{\circ}\text{C}$ | 磅 - 力 (pound-force) | lbf |
| 直流 (direct current) | dc | 功率因數 (power factor) | PF |
| 電子伏特 (electronvolt) | eV | 徑, 弧度 (radian) | rad |
| 法拉 (farad) | F | 電阻·電感·電容 (resistance-inductance-capacitance) | RLC |
| 呎 (foot) | ft | | |
| 克 (gram) | g | | |
| 亨利 (henry) | H | 每秒轉數 (revolutions per second) | rps |
| 赫茲 (hertz) | Hz | | |
| 小時 (hour) | h | 均方根 (root-mean-square) | rms |
| 吋 (inch) | in | 秒 (second) | s |
| 焦耳 (joule) | J | 伏特 (volt) | V |
| 凱因 (kelvin) | K | 伏安 (voltampere) | VA |
| 仟克 (kilogram) | kg | 瓦特 (watt) | W |
| 米 (meter) | m | 瓦時 (watthour) | Wh |
| 米·仟克·秒 (meter-kilogram-second) | mks | | |

[注意：十進制系統的標準字首可參見 1-2 節的表格。]

希臘字母

| | | |
|---------|------------|-----------|
| alpha | α | A |
| beta | β | B |
| gamma | γ | Γ |
| delta | δ | Δ |
| epsilon | ϵ | E |
| zeta | ζ | Z |
| eta | η | H |
| theta | θ | Θ |
| iota | ι | I |
| kappa | κ | K |
| lambda | λ | Λ |
| mu | μ | M |
| nu | ν | N |
| xi | ξ | Ξ |
| omicron | \omicron | O |
| pi | π | Π |
| rho | ρ | P |
| sigma | σ | Σ |
| tau | τ | T |
| upsilon | υ | Y |
| phi | ϕ | Φ |
| chi | χ | X |
| psi | ψ | Ψ |
| omega | ω | Ω |

目 錄

| | |
|--|----|
| 第四部份 複 頻 | 1 |
| 第十三章 複 頻 | 3 |
| 13-1 簡 介 | 3 |
| 13-2 複 頻 | 5 |
| 13-3 阻尼正弦激勵函數 | 8 |
| 13-4 $Z(s)$ 和 $Y(s)$ | 12 |
| 13-5 將頻率響應表為 σ 的函數 | 17 |
| 13-6 複頻平面 | 23 |
| 13-7 自然響應與 s 平面 | 33 |
| 13-8 合成電壓比 $H(s) = V_{out}/V_{in}$ 的一種技巧 | 41 |
| 第十四章 頻 率 響 應 | 53 |
| 14-1 簡 介 | 53 |
| 14-2 並聯共振 | 54 |
| 14-3 並聯共振的進一步討論 | 64 |
| 14-4 串聯共振 | 70 |
| 14-5 其他共振形式 | 73 |
| 14-6 刻 度 | 82 |
| 14-7 波 德 圖 | 87 |

| | |
|--------------------|-----|
| 第五部份 雙埠網路 | 115 |
| 第十五章 磁性耦合電路 | 117 |
| 15-1 簡 介 | 117 |
| 15-2 互 感 | 118 |
| 15-3 能 量 觀 點 | 127 |
| 15-4 線性變壓器 | 130 |
| 15-5 理想變壓器 | 136 |
| 第十六章 雙埠網路 | 155 |
| 16-1 簡 介 | 155 |
| 16-2 單埠網路 | 156 |
| 16-3 導納參數 | 160 |
| 16-4 一些等效網路 | 169 |
| 16-5 阻抗參數 | 178 |
| 16-6 混合參數 | 185 |
| 16-7 傳輸參數 | 188 |
| 第六部份 訊號分析 | 205 |
| 第十七章 傅立葉分析 | 207 |
| 17-1 簡 介 | 207 |
| 17-2 傅立葉級數的三角函數形式 | 210 |
| 17-3 對稱的應用 | 217 |
| 17-4 週期激勵函數產生的完全響應 | 223 |
| 17-5 傅立葉級數的複數形式 | 226 |
| 第十八章 傅立葉轉換 | 241 |
| 18-1 簡 介 | 241 |
| 18-2 傅立葉轉換的定義 | 242 |

| | | |
|----------------------|------------------|------------|
| 18-3 | 傅立葉轉換的一些重要性質 | 246 |
| 18-4 | 單位脈衝函數 | 250 |
| 18-5 | 一些簡單時間函數的傅立葉轉換對 | 256 |
| 18-6 | 一般週期性時間函數的傅立葉轉換 | 261 |
| 18-7 | 時域中的迴旋及電路響應 | 263 |
| 18-8 | 頻域中的系統函數和響應 | 271 |
| 18-9 | 系統函數的實際意義 | 275 |
| 第十九章 拉卜拉斯轉換技巧 | | 287 |
| 19-1 | 簡 介 | 287 |
| 19-2 | 拉卜拉斯轉換的定義 | 288 |
| 19-3 | 一些簡單時間函數的拉卜拉斯轉換 | 292 |
| 19-4 | 拉卜拉斯轉換的一些基本定理 | 295 |
| 19-5 | 再 談 迴 旋 | 302 |
| 19-6 | 時間平移及週期函數 | 306 |
| 19-7 | 在複頻中的平移、微分、積分及刻度 | 312 |
| 19-8 | 初值及終值定理 | 316 |
| 19-9 | 轉移函數 $H(s)$ | 318 |
| 19-10 | 完 全 響 應 | 321 |
| 單數問題解答(下冊) | | 335 |
| 中英名詞對照表 | | 345 |

第四部份

複 頻



第十三章

複 頻

13-1 簡 介

本章介紹電路分析的第四部份，即複頻的概念。這是一種非常傑出的概念，可以將我們前面所發展出來的各種分析技巧，結合成非常簡潔的一套方法。在複頻概念的整合之下，電阻性電路分析、穩態正弦分析、暫態分析、強制響應、完全響應，以及分析由指數激勵函數及指數式阻尼正弦激勵函數所激發的電路，都可被視為電路分析技巧的特例。

在介紹複頻之前，我們先考慮一個指數式的阻尼正弦函數，如以下電壓：

$$v(t) = V_m e^{\sigma t} \cos(\omega t + \theta) \quad (1)$$

其中 σ (sigma) 為實數，且通常小於零。雖然我們稱此函數為“阻尼”，但是如果 σ 變為正數，則正弦波的振幅可能隨之增大；然而在一般實際電路中，很少發生這種情況。由 RLC 電路的自然響應，可得知 σ 是指數阻尼係數的負值。

令(1)式的 σ 及 ω 均為零，可得到恒定電壓，即：

$$v(t) = V_m \cos \theta = V_0 \quad (2)$$

若只有 σ 為零，則可得到一般的正弦電壓：

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta) \quad (3)$$