

電 路 學

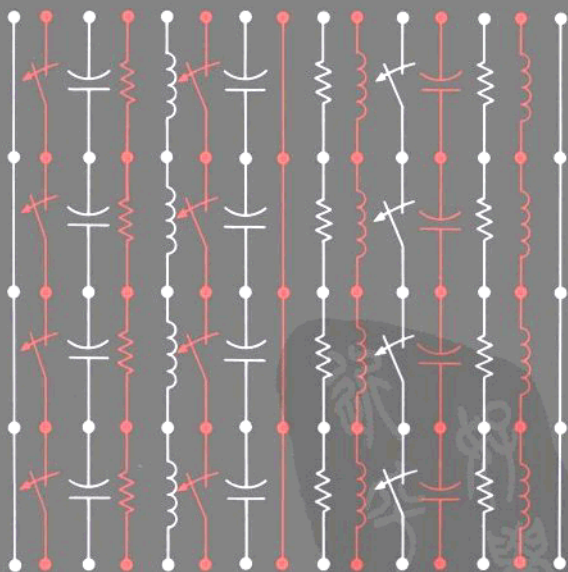
Electric Circuits

下 冊 第二版

原著者：James W. Nilsson

譯述者：林登彬 包蒼龍

杜日富



科技圖書股份有限公司

原 序

序 義

電機工程師，從事開發合乎時代潮流需求的多功能系統，其範圍涵蓋著，從小能量的產生、傳輸、控制到巨大能量的使用與控制等。在發展節省人類勞動力與強化人類計算力的機器方面，電機工程師也擔任相當重要的角色，同時機器間軟、硬體的相互聯繫發展，產生通信交換、儀器應用以及控制等方面的複雜系統，這些系統的設計、開發，有些要視其是否有能力建立電力與連接組件的數學模式。就一般而言，這些數學模式是根據電磁場與電路理論得知。本書目的在說明有關電路分析的理論。

必備事項

在本書第一到十四章中，讀者必需具備微分與積分基礎，同時，在高中及大學時，已具備有關能量、功率、電荷、電流、電位以及電磁場等物理觀念。同樣在讀第十五到二十章，亦假設對微分方程式已有相當認識。

內容與結構

從第一章到第四章，將從電阻線路，說明傳統的線路分析概要。諸如：歐姆 (Ohm) 定律、克希荷夫 (Kirchhoff) 定律、節點與網目分析、戴維寧 / 諾頓 (Thévenin/Norton) 等效電路以及重疊原理等。在此需特別提出的是：d'Arsonval 電流錶、電壓錶有兩個原因需提早在第三章中說明。原因之一；這些類比電錶即使在實驗室以外，亦能照常使用。其二；藉以提供分析若干簡單但很重要的電阻線路

。第五章為 RL , RC , RLC , 電路在電源變化時所受干擾的現象。

同樣，運算放大器，亦基於三個理由，在本書第九章中特別列出。其一為，提供初學者認識，現今線路設計中的基本建立方塊 (building block)，其二為，提供初學者廣泛的機會分析電路結構，以增進實用性。其三為，運算放大器在實驗室中之多功能數位電錶中，佔有重要角色。在第九章亦再論及此一重要數位電錶的操作。

由正弦型電流源所導引的穩態電路分析，將在第十與第十一章中說明。其中如；相位觀念，與由時間到相位領域的轉變分析，均為本章的重點。此外，實功率、抗功率及複功率的意義等將一併討論。第十二章要介紹有關平衡三相電路的運算，同時，又提供更多有關相位領域實例的分析。第十三章的主題為電感概念。其中，線性變壓器與理想磁圈變壓器的分析在於強調磁耦合的重要性而設。

首先談到頻率響應在第十四章，在本章中討論些並聯與串聯問題。這些簡單的串聯、並聯結構，將使讀者瞭解諧振頻率、頻帶寬與頻率選擇的品質等重要觀念。

在第十五與第十六章中，說明線路分析用的重要工具，Laplace 轉換。概略的內容是，功能轉換、運算轉換、部分分式展開、 s - 領域、等數線路以及 Dirac 的 delta 函數等。第十七章中主要引導由轉換函數，與迴旋積分，進而擴展轉換方法的適用範圍，同時轉換函數亦可經由對波德 (Bode) 波幅與相角圖的瞭解，而加寬帶原先的頻率響應範圍的期望。

第十八章是討論週期性電源所形成的穩態反應線路，其中 Fourier 級數，代表週期性函數首次被發展，並用在線路分析上。用 Fourier 級數的指數形式以說明 Fourier 轉換為第十九章的主題。其何以 Fourier 級數如此的快速就成為人們廣泛使用的 Fourier 轉換，這是由於 Fourier 級數，提供對 Laplace 轉換的最佳實質詮釋。

本書最後一章為有關雙埠參數如： z , y , a , b , h 及 g 等。這些參數間的關係，將列在表 20.1 中。雙埠參數的分析總結亦摘要列

在表 20.2 中。

除上述說明外，本書並提供很多例題幫助讀者瞭解如何應用理論來分析電路結構，同時亦有許多習題，幫助各位測驗自己對所讀課程的瞭解程度；這些跨在每個章節間的研習題，其目的不外是提醒各位在你進入下一章節前，必需先予解出，並瞭解這些習題。

本書可供兩學期制或三季制的學校而設計的。若每週有三節電路課，對兩學期制的學校第一學期的進度為前十二章，第二學期將後列八章講完。若是三季制學校，本書亦可分為第一到八章，第九到十五與第十六到二十章三個階段教授。

同時，本書亦可用作電路分析課程只有一學期的時間，其課程的編排如下：教師可在講完前八章後，從第九章（運算放大器），第十二章（三相線路），第十三章（互感電感），第十四章（共振）與第十八章（Fourier 級數）中選擇所需強調的觀念予以教授。

值得一提，本書中有關運算放大器部分的說明可以省略而不致影響後面各章節。若將第九章省略，講師亦需同時省略第九章以後的所有有關運算放大器的習題。

本書中其廣泛所引用的數字例題，是為幫助讀者瞭解這些理論應如何應用在電路的構造分析。書中所引用的研習題，是為給讀者一機會去測試他們對剛讀過的內容之瞭解程度。其跨全頁印出的練習題作為提示讀者在處理下一節前先停留解此練習。

本書最後有四項附錄，是協助讀者可有效地發揮其數學基礎。附錄 A 為複習解聯立線性方程式的克拉莫浩（Cramer method）；附錄 B 為複習複數；附錄 C 為提供三角恒等式的簡表（三角恒等式在電路分析時是很有用途的）；附錄 D 為有用的積分簡表。

習 題

在設計這些習題時，我有四種目標的構想。第一，要有某些習題能助讀者在分析電路時獲得自信的能力；第二，建立一些能指導讀者

在簡單，且有用於電路的注意之習題，在第二章中，即要求學生設計一個容許控制，有兩個或更多位置的裝置之開關排列；第三，介紹一種被認為可激起初學者的偶發性之習題，例如在第七章最後的一些問題，包含由“黑盒子”觀點的不穩定與旋定複雜盪器電路，我已去除在界限中有五個緊密水平線更具有挑戰性習題，且告知這些習題可能為其它課程中所需要的問題；第四，介紹少數而能提供初學者動機的問題，在習題 10-43 中，要求學生假設技術專家的規則，並解釋農夫為什麼不能發覺在牲畜封閉建築物中的通風系統之損壞。

給學生的話

最後給學生們的一些話，工程課程有兩互相牽連的主要主題。第一是教導有關反映技巧說明之電流及組件與量有關的訊息。第二是開發可適用於很多種特定問題的分析與合成之方法。養成思考習題之學生以實際的數字來表示，此數字係以量來敘述已存在的系統，且同時集中他們的注意力在原理上。在不同系統與組件分析下，這些原理最好的位置上展開，並且在迅速變化之方法中成功。作為一個實際的工程師，不必要求你去解出已經解決的問題，只要你試着去改進一些已存在系統之性能，並且你能建立一個新的系統。作為一個學生必須更專心你的注意力在已解過的問題來討論。經由已如何解過的問題來討論，你可擴大如何着手的技巧與解決未來的問題。

感謝詞

在從事三十年教育中，我不能不感謝那些幫助我成為一位工程教育者的所有人們。我衷心感謝一些在我寫本書時給我批評與指正的同事們，C. Cowan, H. Hale, E. Jones, Jr. 與 W. A-Shohoud 教授等，他們提供寶貴的課堂講義，T. Scott 教授給我指教良多。同時，我亦感謝 N. Bose, J. Delansky, J. W. Howze, G. Lago, S. K. Mitra 與 K. Mondal 諸教授代我校正原稿，並給我寶貴意見。

在此，又謝謝 Iowa 州立大學電機系系主任 J. O. Kopplin 博士與工學院院長 D. Boylan 博士，在我準備手稿期間給我的支援。最後，謝謝 S. Siders 小姐將原稿打字並作最後定稿。

在改編此第二版時，我希望對於那些曾經使用及看過本書第一版以提供很多有用建議的先進，以表示我的謝意：德州農工大學 John A. Fleming 教授，波德蘭州立大學 Richard D. Morris 先生，海軍研究院 Glen A. Myers 先生，維吉尼亞技術專科及州立大學 F. W. Stephenson 先生，克拉克遜學院 James Svobaba 先生及奧立岡州立大學 Leonard J. Weber 先生。

更要特別感謝伊荷華州立大學的同事，他們從第一版開始就提供結構上的意見：Edwin Jones 教授、Kenneth Kruempel 教授、Curran Swift 教授及 C. J. Triska 教授等，尤其對於伊荷華州立大學行政部門的繼續支持致最大的謝意和第一版一樣，我要深深地感謝 Shellie Siders 小姐，不只爲了其文字處理的技巧，而且也由於其自動自發幫助我維持了進度上的目標。

我也要感謝 Addison-Wesley 的諸位先生，他們在出版本書時的出色的工作。特別要感謝出版的 Bette Aaronson 先生。也很高興能得到助理編輯 Don Fowley 先生之支持與發行人 Tom Robbins 的繼續支持及鼓勵。

J. W. Nilsson

電路學(下冊)

目 錄

原 序

目 錄

第十二章 平衡三相電路

12.1	簡 介	1
12.2	平衡三相電壓	2
12.3	三相電壓源	4
12.4	Y - Y 電路分析	6
12.5	Y - Δ 電路分析	16
12.6	Δ - Y 電路分析	22
12.7	Δ - Δ 電路分析	26
12.8	平衡三相電路的功率計算	26
12.9	三相電路的平均功率測量	36
12.10	摘 要	42
12.11	習 題	43

第十三章 互 感

13.1	簡 介	53
13.2	自感的複習	53
13.3	互感的概念	55
13.4	互感電壓的極性(點表示法)	60

2 電路學 (下冊)

13.5	能量計算	67
13.6	線性變壓器	71
13.7	理想變壓器	79
13.8	磁耦線圈的等效電路	87
13.9	理想變壓器在等效電路中的必要性	95
13.10	摘 要	102
13.11	習 題	102

第十四章 串聯與並聯諧振

14.1	簡 介	115
14.2	並聯諧振概念	116
14.3	頻寬與品質因數	119
14.4	並聯諧振進一步之分析	124
14.5	頻率響應對並聯 RLC 電路的自然響應	130
14.6	串聯諧振	131
14.7	其他並聯諧振	137
14.8	其他的串聯諧振	147
14.9	尺度變換	153
14.10	摘 要	157
14.11	習 題	158

第十五章 Laplace 轉換

15.1	簡 介	173
15.2	Laplace 轉換的定義	174
15.3	步階函數	177
15.4	脈衝函數	181
15.5	函數轉換	188

15.6	運算轉換	190
15.7	例題說明	197
15.8	反拉氏轉換	199
15.9	$F(s)$ 的極點與零點	211
15.10	初值與終值定理	213
15.11	摘 要	217
15.12	習 題	218

第十六章 電路分析中的 Laplace 轉換

16.1	簡 介	226
16.2	在 s 域中的電路元件	227
16.3	s 域中的電路分析	232
16.4	舉例說明	233
16.5	電路分析中的脈衝函數	250
16.6	摘 要	264
16.7	習 題	265

第十七章 轉換函數

17.1	簡 介	277
17.2	重疊法在 s 域的應用	277
17.3	轉換函數	282
17.4	用部分分式求轉換函數	285
17.5	轉換函數與迴旋積分	289
17.6	轉換函數與正弦穩態響應	303
17.7	Bode 圖	306
17.8	複數極點與零點的 Bode 圖	318
17.9	dB	331

4 電路學 (下冊)

17.10 摘要	333
17.11 習題	334

第十八章 Fourier 級數

18.1 簡介	346
18.2 Fourier 級數分析：概觀	348
18.3 Fourier 係數	350
18.4 對稱性對 Fourier 係數的影響	354
18.5 Fourier 級數的另一三角函數表示法	364
18.6 實例解釋	367
18.7 週期性函數的平均功率計算	374
18.8 週期性函數的均方根值	378
18.9 Fourier 級數的指數形式	380
18.10 振幅譜與相位譜	384
18.11 均方誤差	389
18.12 摘要	392
18.13 習題	393

第十九章 Fourier 轉換

19.1 簡介	408
19.2 Fourier 轉換的導求	408
19.3 Fourier 積分的收斂	412
19.4 用 Laplace 轉換求 Fourier 轉換	415
19.5 極限下的 Fourier 轉換	418
19.6 若干數學特性	422
19.7 運算轉換	425
19.8 電路應用	428

19.9	Parseval's 定理	433
19.10	摘 要	445
19.11	習 題	446

第二十章 雙埠電路

20.1	簡 介	452
20.2	端點方程式	453
20.3	雙埠參數	454
20.4	終結雙埠網路分析	467
20.5	互連雙埠網路	475
20.6	摘 要	479
20.7	習 題	481

習題答案

第十二章 平衡三相電路

12.1 簡 介

大型電力系統的發電機、傳輸線、分電盤以及負載設備，均為三相電路。對三相電路作廣泛分析，是一門獨特學問。不可能期待用一章節能敘述清楚。幸而，對一位非專攻電力系統的工程學生而言，若能對“平衡”三相電路 (balanced three-phase circuit) 的穩態交流特性有些瞭解，便已足夠。以下會對“平衡電路” (balanced circuit) 下個定義。在此，可注意到，有兩個理由使本節僅限於平衡操作 (balanced operation) 的簡介。第一，依經濟上的理由；三相系統均被設計在平衡態下操作，也就是說，三相電路在正常操作的情況下，與假設其為完全平衡，而所算得的結果十分相近；第二，某些不平衡操作型態，可用一些技術來解決，也就是一般所知的對稱性分量法 (symmetrical components)，而此種方法亦是完全倚賴對平衡操作的瞭解。雖然並不擬討論此種對稱性分量法，但值得注意，對分析某些特定不平衡型態的最新技術的基礎，便要先熟悉平衡系統的操作開始。

三相系統的基本結構，包含經由變壓器、傳輸線到達負載的各個電壓源。對一個電壓源，經由傳輸線連接到負載的電路，可消除在分析上的問題。將變壓器簡化成系統上的單一元件，使其在討論時所用到的計算予以簡化成最基本的形式。基本的線路如圖 12.1 所示。在開始分析此種形式的線路時，應先瞭解一個平衡三相電路加上交流電壓時的特性。

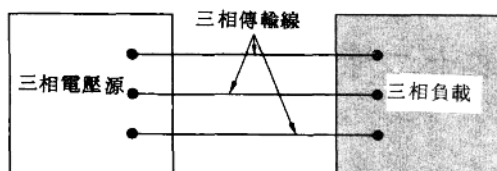


圖 12.1 基本三相電路

12.2 平衡三相電壓

一組平衡三相電壓，係由三個交流電壓源所組成。它們具有相同的振幅與頻率，但彼此卻相差整 120° 。在討論三相電路時，標準辦法是將此三相分別用 a、b 與 c 來代表，而且幾乎都用 a 相位為基準參考相位。這三個組成三相電壓組的電壓，也因此被稱為 a 相電壓、b 相電壓與 c 相電壓。

因三個相電壓各自相差整 120° ，故僅可能有兩種相位關係存在於 a 相電壓、b 相電壓與 c 相電壓之間。一種可能性為，b 相電壓落後 a 相電壓 120° 。如此，c 相電壓必然領先 a 相電壓 120° 。這種相位關係稱為 abc 或“正相序”（positive phase sequence）；另一種可能性則為，b 相電壓領先 a 相電壓 120° ，如此 c 相電壓必然落後 a 相電壓 120° 。這種相位關係稱為 acb 或“逆相序”（negative phase sequence）。若用相位角來表示，此兩種可能的平衡三相電壓組態為

$$\begin{aligned} V_a &= V_m \angle 0^\circ \\ V_b &= V_m \angle -120^\circ \\ V_c &= V_m \angle +120^\circ \end{aligned} \quad (12.1)$$

以及

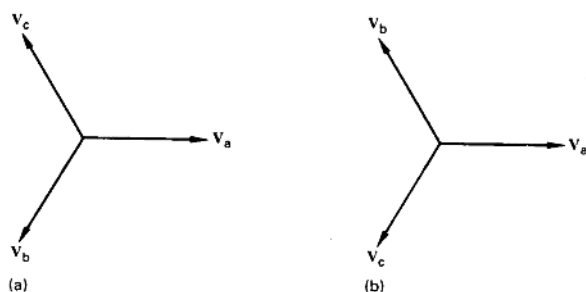


圖 12.2 平衡三相電壓組的相位圖。(a) abc (正) 相序；(b) acb (逆) 相序

$$\begin{aligned} V_a &= V_m \angle 0^\circ \\ V_b &= V_m \angle +120^\circ \\ V_c &= V_m \angle -120^\circ \end{aligned} \quad (12.2)$$

式 (12.1) 所表示的相位順序為 abc，或稱正相序。式 (12.2) 所示的相位順序為 acb 或稱逆相序。式 (12.1) 與式 (12.2) 所表示的三相電壓組，若繪成相位圖，則如圖 12.2 所示。由該圖，只要依順時針走向讀取各相電壓的指標，便可得知其相序。每當兩個三相電路作並聯操作時，必需考慮到三相電路具有兩種可能不同的相序，此一特性非常重要。“兩個三相電路唯有在具同相序的情況下，始能並聯操作”。

平衡三相電壓組的另一個重要特性是“三個相電壓的總和為零”。利用式 (12.1) 或式 (12.2)，可得

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (12.3)$$

結果此相電壓的總和為零，亦表示瞬時電壓和為零；亦即

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (12.4)$$

另一點要注意，若能知道一組電壓的相序，與其中一個電壓值，便能知道整組的狀態。因此，若有一組平衡的相系統，便可將各相電壓（或電流）用其中的一相來表示。因一旦知道其中一相的值，便可自動地得知其他兩相的相對值。

研習題 12.1

問下列各電壓組的相序為何？

- a) $v_a = 208 \cos(\omega t + 76^\circ) \text{ V}$
 $v_b = 208 \cos(\omega t + 316^\circ) \text{ V}$
 $v_c = 208 \cos(\omega t - 164^\circ) \text{ V}$
- b) $v_a = 4160 \cos(\omega t - 49^\circ) \text{ V}$
 $v_b = 4160 \cos(\omega t - 289^\circ) \text{ V}$
 $v_c = 4160 \cos(\omega t + 191^\circ) \text{ V}$

答案：(a) abc; (b) acb

12.3 三相電壓源

作為三相電壓源的發電機，其內部有三個分開的繞組，平均分佈在定部（stator）的周圍，每個繞組構成發電機的每個相電壓源。發電機的轉部（rotor）為轉動的大電磁鐵，與主要的動力機，如蒸汽渦輪、氣渦輪等作同步運轉。當轉部的磁極轉繞過定子的三個繞組時，在每個繞組上便會感應出交流正弦型電壓。此三個相繞組便被設計來感應相同振幅與各相差 120° 的交流電壓。因相繞組為固定設置，對同一轉動電磁鐵而言，在每個繞組所感應的電壓頻率均為相同。

就一般而言，三相發電機的每個繞組的阻抗，均遠較電路中其他阻抗為低。因此，取其大約值，每相繞組在電路中可視為一個理想交流電壓源。三個獨立的相繞組接成三相電源的接法計有兩種，可接成 Y 組態或者 Δ 組態，如圖 12.3 所示。其中理想電壓源表示三相發電機的相繞組。在圖 12.3 (a) 所示的 Y 接法中，標有“n”字母的三相公共端，便為此電壓源的中性端點（neutral terminal），當外接電

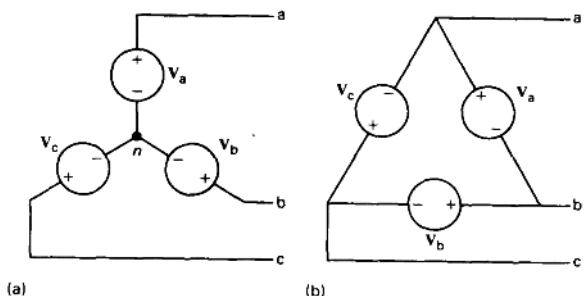


圖 12.3 理想三相電源的兩種基本接法：(a) Y 接電源；(b) Δ 接電源

路時，此中性端點可接，亦可不接。

若每一相繞組的阻抗不可忽略時，便在每個理想交流電壓源上串接相繞組的阻抗來模擬。因每個繞組在機械上都是同樣結構。故假設每個繞組的阻抗都是相同。三相發電機的繞組阻抗為電感性的。一個含繞組阻抗的三相電源，如圖 12.4 所示。其中 R_w 為繞組的電阻抗 (winding resistance)， X_w 為繞組的感抗 (inductive reactance)。

一個三相電壓源可接成 Y 接法或 Δ 接法的事實，表示圖 12.1 所示的基本電路，可有四種模型，因三相負載亦可接成 Y 連接或 Δ 連接。這四種可能的安排為：(1) 一個 Y 接電源與一個 Y 接負載；(2) 一個 Y 接電源與一個 Δ 接負載；(3) 一個 Δ 接電源與一個 Y 接負載；以及 (4) 一個 Δ 接電源與一個 Δ 接負載。

由上述的第一種安排開始分析三相電路。在分析過 Y-Y 接法電路後，將可證明在一個平衡電路中，其餘的三種安排均可化成一個 Y-Y 接法的等效電路。換句話說，分析 Y-Y 接法電路，便是分析所有平衡三相接法的主要關鍵。

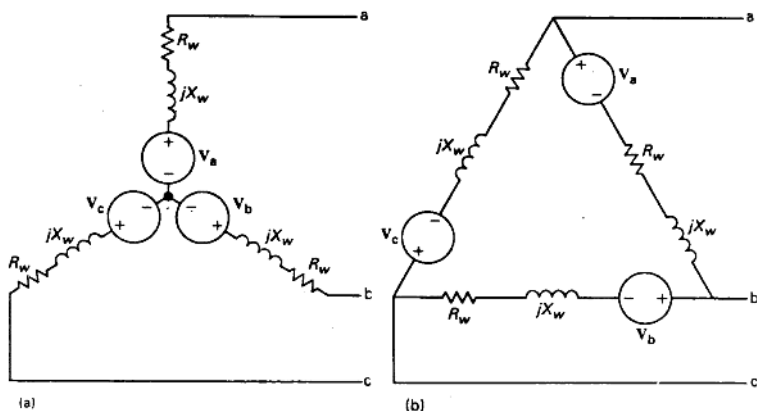


圖 12.4 包含繞組阻抗的三相電源模型：(a) Y 接電源；(b) Δ 接電源

12.4 Y-Y 電路分析

現開始分析 Y-Y 電路，並假設其為不平衡電路。如此做，便能說明何謂平衡三相電路，並可說明用電路分析的角度來看，平衡後會有何影響。一般 Y-Y 電路如圖 12.5 所示，其中含電源中性點到負載中性點的第四條導線 (conductor)。此第四條導線僅在 Y-Y 電路中才存在 (以後會詳述)。同時，注意，為求方便繪圖起見，將 Y 接法化為兩個“傾倒 T 字型” (tipped-over tees)。在圖 12.5 中， Z_{sa} , Z_{rb} 與 Z_{gc} 分別代表各相電壓源繞組的內部阻抗； Z_{1a} , Z_{1b} 與 Z_{1c} 代表各相電源到負載間的連線的阻抗； Z_0 為連接電源中性點到負載中性點的連線阻抗；而 Z_A , Z_B 與 Z_C 代表各相負載的阻抗。

圖 12.5 所示的電路，可由一個單獨的節點電壓方程式來描述。