

5008

2214

部譯學術著作

科學新知 / 技術先導

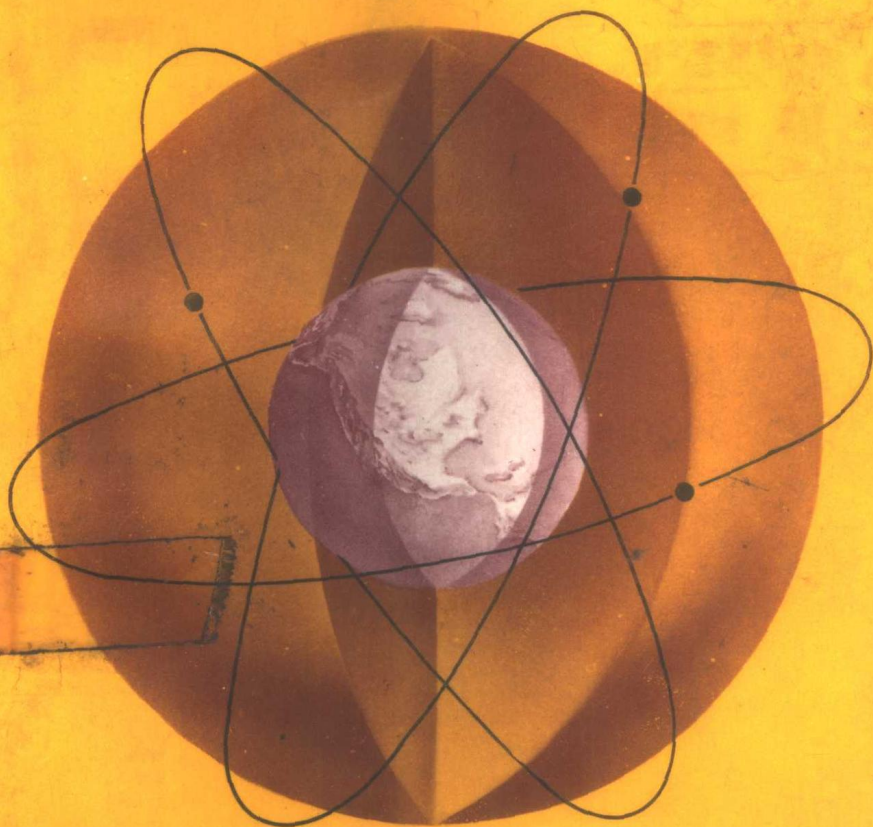
計算機分析電路法

Leon O. Chua Pen-Min Lin 原著

任建葳 譯

國立編譯館 主編

五南圖書出版公司 印行



5002
2214

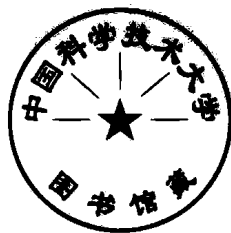
674879

5002
2214

科學新知 技術先導

計算機分析電路法

國立交通大學電工系副教授 任建戴 譯



國立編譯館 主編
五南圖書出版公司 印行

計 算 機 分 析 電 路 法

中華民國71年 3 月初版

著 者 任 建 巖

著作權
所 有 人 國 立 編 譯 館

發行人 楊 榮 川

發行所 五南圖書出版公司
局 版 臺 業 字 第 0598 號
臺 北 市 銅 山 街 1~1 號
電 話 : 3916542 號
郵 政 劃 撥 : 106895 號
印 刷 所 明 文 印 刷 廠

基本定價：8.89 元

(本書如有缺頁或倒裝，本公司負責換新)

序

在過去，大多數的電子電路設計都是由工程師用紙和筆來做的。這種設計方法，除了工程師要有基本訓練，以及豐富的設計圖、表等工具外，還十分依賴設計工程師本身對電路設計的直覺、過去的經驗，及做合理“近似”的判斷。後來發展到“接線板階段”，初步的設計結果，經由反覆的調整電路元件，可以獲得進一步的改進。

然而，積體電路的發展和進步，使得整個景觀有很大的改變。不僅電路本身變得較大、較複雜，而且規格也要求得較嚴。如果我們考慮到結果的準確度，以及完成一個設計所花的時間等因素，紙和筆的方法就不再能適用了。同時“接線板試驗”的幫助也愈來愈小，這是因為我們不可能用分立組件來百分之一百地複製一個積體電路。另外一方面，積體電路的面罩(mask)製作是十分花錢的。除了金錢上的花費外，實際上也無法做容忍度與最壞狀況的研究。在這種環境之下，計算機就成為一個很重要的設計工具。我們不再在接線板上模擬電路了，我們發展一個計算機程式來模擬與分析電路。這種計算機輔助分析電路實在就是邁向自動化設計電路的第一步。另外一項重要的設計工具是須要一個高效率求最佳化的技巧。在今天，電路模擬程式已被認為做電路設計不可缺少的工具。

本書是致力於做計算機輔助電路分析的工作，並強調演算法和各種計算技巧。本書適合於電機工程四年級和研一的同學做為研習課本之用。我們希望同學在讀完本書之後，不僅對目前已有之許多計算機模擬程式所用的基本原理與演算法有完全的瞭解，而且具備了能力去發展出一個小規模、專用途的模擬程式給自己用。本書所需要的知識

2 序

包括(1)基本電路分析(正弦穩態分析,拉普拉斯轉換法), (2)基本矩陣代數(乘算、反運算、區分)。這類的基礎應該是電機系四年級同學都具備的。

本書內容的準備,當初是基於不能滿足需要的動機而引起的。在開始寫這本書的時候(大約四年前),已經有十餘本關於計算機分析電路這一方面的書籍。我們詳細地閱讀了這些書,發覺都可歸併於下列各類:

- 1.範圍太窄。一些書詳細地討論如何使用某個模擬程式,而對於基本理論很少涉及。這類書雖然對於正好有這個程式的工程師很有幫助,但就不適合作為一般大學生的課本。
- 2.太基本。這類書籍只膚淺地接觸到一些重要的主題,而未深入地討論到實用方面。舉例來說,狀態方程式列式的討論,只侷限於線性RLC網路,並未包括控制電源。這種書往往不能滿足實際從事設計的學生之需要。
- 3.太深奧。有些書是為了已經有這方面知識的人而寫的。
- 4.編輯成冊的。這類書很多,因為一組專家的努力是有限的,每一篇文章不可能把各方面的現況全部顧及,它只能就他們的專長方面詳加敘述。這種編輯成冊的缺點是各篇文章所用符號不一致,而且各篇間的協調也差。這類書是研究者很好的參考資料,但却不是好的教科書。

在這種環境下,作者在四年前開始準備這本書。其中內容多半是加大柏克來分校及普渡大學上課所用的講義。本書引導學生由基本一步一步走進較深的主题。另外附上一些適當的參考文獻,提供做更進一步的研究。我們強調演算法,而不注重程式細節;因為前者具有通用性,後者是因所用的程式語言(FORTRAN, APL等)而異。我們

並不特別擁護某種方法，我們的演算法取材是均衡而不偏頗。各位可在目次或下面各章簡短介紹中看出。

在第1章的前三節中，我們把需要計算機模擬程式求解的問題定義出來，並描述計算機模擬程式的主要內涵，且提供一些應用這些程式的實際例子。在第1章的其餘各節裡，我們對許多模擬程式的基本技巧、特質，和相關的數值問題，做了一些很簡單、很基本的解釋，期使學生易於較深入地研讀接以下各章。

在第2章，我們討論電子電路中常用到的電子零件與裝置模型化的原理。我們描述了接面二極體與雙極性電晶體的模型。至於其他半導體裝置的模型就不提及，因這一方面的詳細內容已超出本書的範圍。用來合成三端接裝置之dc電路模型的“黑盒作法”，我們有較詳細地描述，因為這一方面的討論未在其他書中見到。若對黑盒作法有完全的瞭解，過去許多計算機模擬程式不允許的電路元件，現在就可轉換成一可接受的等效電路。本章中也包括了運算放大器的黑盒“巨”電路模型，它不僅可用來模擬頻率和相位的特性，也可模擬各種重要的非線性效應，例如運算放大器的轉動率限制等。我們詳細地說明推導這模型所需的原則，這不僅是藉此說明黑盒模型作法的用途；更重要的理由是類似的作法可以應用到其他的IC模型上。

在第3章，我們提出用在電路分析上的圖形理論。本章所導的結果在下列各章非常有用：拼合矩陣列式（第6章）、以及狀態方程式列式（第8和10章）、符號網路分析（第14章），以及連合網路靈敏度分析（第15章）。我們有不少的篇幅用來描述各種拓撲矩陣的計算機產生法。

在第4章，我們對線性網路的節點分析提出較詳細的研究，並着重在數位計算技巧的使用。本章的內容是完全獨立的。本章的附錄內

有一稱做NODAL的程式，可用來給學生作專題研習計劃的起點，以繼續發展成一完全的程式。我們的經驗顯示，這類專題研習計劃對學習本書是大有助益的。

在第5章，我們將節點分析法延伸到非線性電阻網路上。這裡介紹一個定值點演算法，它是一種綜合性的觀念，以後的幾個演算法——牛頓拉福森（5—4節）、預測數——改正數（11—5—2節），以及週期解（17—5—1節）——都可看做是它的特殊情況。我們詳細地討論解非線性方程式所最常用的牛頓—拉福森法。事實上，非線性電阻網路的解就是許多計算機模擬程式的基石，求解的過程即所謂的dc分析。用來實現非線性電阻網路牛頓—拉福森法的“分立線性電阻電路模型”，我們有詳細地介紹。

在第6章，我們描述了線性電阻 n 埠之拼合矩陣的計算機列式法。和第3章一樣，本章所得結果在接下來的幾章（第7，8，10，15章）中都用到。與此有關之分析技巧就是所謂的拼合分析。雖然它不像節點分析那麼有名，但有許多電路要依賴此分析技巧，因為它提供了計算上的方便。舉例來說，這種作法非常適用於分析一個含有非單變電壓控制非線性電阻或非單變電流控制非線性電阻的電路。它也十分適用於分析一個含有許多線性電阻的非線性電路，因為非線性方程式的數目就等於電路中非線性電阻的數目。

在第7章，我們應用第6章的拼合矩陣法來做非線性電阻網路的分析。我們描述了解片斷線性網路所常用的幾個演算法。雖然在計算上比第5章的牛頓—拉福森法較無效率，但片斷線性作法至少有兩個優點。第一、對於各類的非線性網路，7—3節所提的片斷線性作法保證會收斂，而不管起始猜選是如何。第二、它是唯一能找出非線性電阻網路“所有”解的作法。

動態線性網路之狀態方程式的列式是在第8章討論，動態非線性網路之狀態方程式的列式是在第10章討論。第6章的拼合矩陣觀念在這兩章中扮演了基本的角色。雖然從程式和計算的觀點來看，在發展大型模擬程式時，狀態方程式的作法不如列表作法（17-2節）那麼吸引人，然而狀態方程式的列式和觀念在許多其他方面仍是相當地重要。例如關於穩定度，暫態衰減，分歧行為等性質上的分析都須仰賴網路狀態方程式的列式。

狀態方程式之數值積分技巧，和相關的穩定度以及時間常數問題在第11，12，13章有相當完全的處理。這幾章本身形成一獨立的專題，它包括常微分方程式最新的數值積分技巧，所以也可提供作為系統分析、模型、模擬等課程的補充教材。雖然這幾章較偏重於數學，但所有的結果都是用很基本的方法推導出來的。用一綜合作法可以推導三個重要的積分法：明確Adams—Bashforth演算法，隱含式Adams—Moulton演算法，以及隱含式Gear演算法。用一新的作法，把能提供各種多步驟演算法局部截斷誤差的簡單公式推導出來。這種分析導致一有效率之可變階度，可變時階大小預測數——改正數演算法（明確Adams—Bashforth演算法在這裡是當作預測數）的列式。在這裡，我們採用了差分方程式作法來做穩定度的分析（而不用有名的E—轉換作法），因為它較直接而且能給更多的現象解釋。例如它能告訴我們，寄生項如何地破壞數值積分演算法的穩定度。

第9章討論了幾個只能適用於線性網路的特殊數值技巧。這一章也包括計算機決定線性電路轉換函數 $H(s)$ 的方法。此主題在第14章也會碰到，但是以不同觀點來看，最後，計算A矩陣特性值的高效率QR演算法被提出，並附以許多例題來解說。

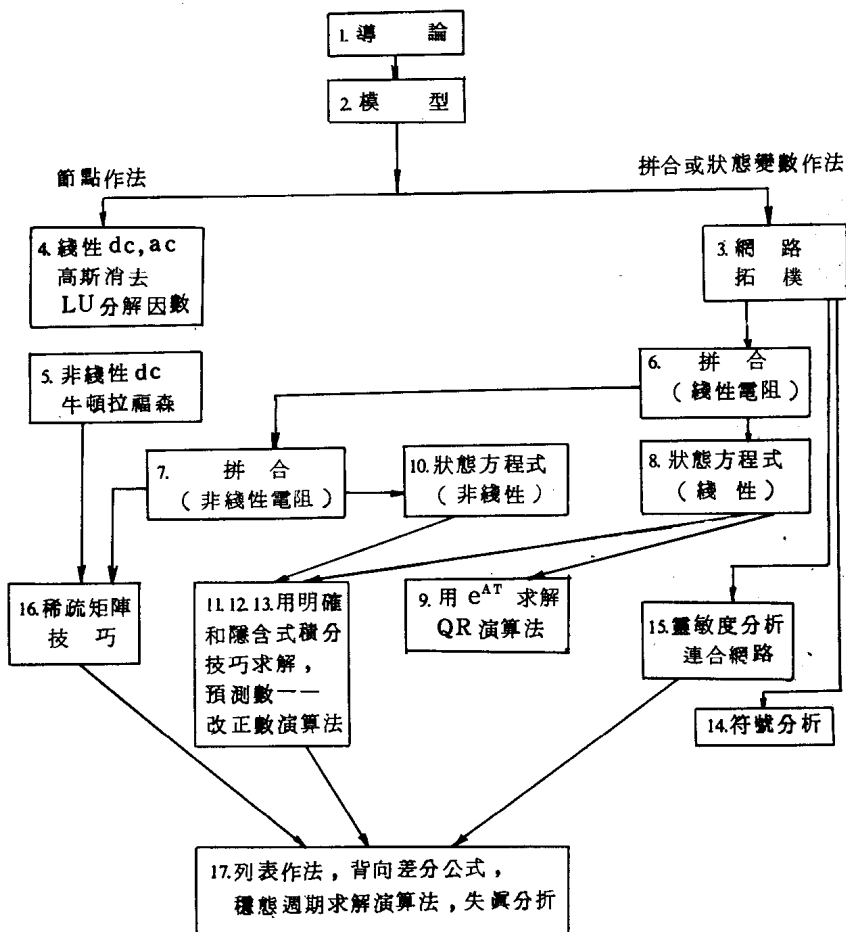
本書的最後四章包括了計算機輔助電路分析裡，較專門且也很重

要的主題。我們知道，分析是設計的第一步。電子電路的自動化設計——一個目前很大的研究主題——須要一個好的分析程式和一個好的求最佳化的方法。大多數的最佳化技巧都須要能夠有效地計算網路函數的偏導數，這些可以由計算機輔助靈敏度分析裡得到。在第15章，我們描述做靈敏度分析的幾種方法。連合網路作法獲得很大的注目，這是因為它的一般性和效率性。然而，符號法的潛力也特別值得一提，在第14章我們已提出計算機產生符號網路函數的方法，本章只是再繼續做靈敏度分析而已。雖然符號分析有一些嚴重的缺點，但在做小型網路靈敏度研究時，仍是十分好用的。

當網路變大時（一百個以上的節點），用稀疏矩陣技巧解大型網路方程式就變成有必要了。雖然目前有很多論文談到稀疏矩陣，但很難找到一篇適合於初學者看的。第16章所寫的就是為了滿足這個需要。由於稀疏矩陣技巧目前仍在發展階段，很多新的而且更有效率的（與本章所提的相比）演算法相繼出現，讀者應該多看這一方面新的論文。

第17章，也是最後一章，是處理並介紹計算機輔助分析電路最近的一些發展結果。其中我們提到了列表作法，它適合於分析大型網路；也提到了一個新而且有效率之演算法，它是用隱含式背向微分公式解微分代數系統。另外本章也包括一個有效率的演算法，它可計算網路（受週期電源推動）的穩態週期響應；另一演算法可以計算非線性振盪器的週期解。最後，我們提出一個可以做非線性通訊電路頻譜分析、失真分析的演算法，作為本章的結束。

這裡我們繪一個描述各章關係的流程圖；在序文之後有一個本書所提各演算法與計算技巧的列表。我們相信，關於計算機輔助電路分析的大多數重要結果和方法都已包括在本書之內。我們之所以決定不包括求最佳化的技巧以及容忍度分析，主要的原因就是這兩個重要主題



會使得本書內容多出太多。再者，這兩個主題畢竟是與計算機輔助“設計”較有關係，所以就不考慮放入本書了。

本書的內容足夠作為大四程度一年的教材。原則上，每章的各節都是依深淺順序（由淺入深）排列。事實上，每章的最後兩節常是較深的材料，如果省略掉也不失去連續性。我們以星號作為這些節的記號。若經適當地挑選主題（不一定依照章的次序），本書可當作一學期（semester）、一學季（quarter）、兩學期，或兩學季課程的教材。下面有個表是針對計算機輔助電路分析的六種典型課程，所作的一種嘗試性的安排。在每一課程裡，我們建議只有第1章的前三節要在課堂上先講，做為引起動機之用。其餘各節可指定同學自己閱讀，以使得同學對後面幾章先有初步的認識。雖然本書中大部份的命題和定理都有數學證明，但這主要是給想做研究的學生參考用的。

每章後面都附有習題。大多數的習題都已通過分級之試驗，所以難易度與複雜度尚能適合一般的學生。若本書是用在大學課程裡，需要較多矩陣代數的習題就可略去。這個就由教師決定。為了避免連續幾年都指定同樣習題，我們提供了一些類似而只是數字不同的習題。

雖然本書的重點是演算法，不在於程式的細節，但我們也列進三個FORTRAN程式。第4章附錄的NODAL程式是利用了該章所描述的列式法與求解技巧。此程式很短，所以每一個學生可以準備一份程式卡片。同學們也可利用此程式做為起點，將它擴展為一個包括dc、ac、暫態分析的程式。

第6章附錄的HYBRID程式是用到第3章和第6—6節所討論的觀念與技巧。它是一個把理論付諸實際的很好例子。再者，由於目前為止，在一般狀況（允許四種型式之控制電源）下求拼合矩陣的程式尚未見過，所以這個程式對從事於計算機輔助設計的研究人員來說，是很有價值的。

課程	課程長度與年級	所包括的章節	補充說明
I	1 學期， 15 星期， 3 小時／星期， 大四學生	1～6 章（略去 4— 4 和 6—6 節），7 ～1，7～2，8～ 1，8～2，8～4 9～5 節； 10～13 章，以及自 15 16 章選出的某些主題。	用節點和狀態變數法做 dc, ac, 暫態分析； 強調隱含式積分技巧。
II	2 學期， 30 星期， 3 小時／星期 大四學生	全本書，除第 17 章 以外。	可以指定發展一些特殊 用途計算機模擬程式， 作為同學分組專題研習 的題目。
III	1 學期， 15 星期， 3 小時／星期， 研一學生	快速溫習：1～4 章 和第 9 章。講課：5 6，8，10，11，12 13，15，16 章及 17 章 的某些主題。	有計算機分析電路基礎 的研究生可跳過 1，2 3，4 各章。
IV	1 學季， 10 星期， 3 小時／星期， 大四學生	1，2，4，5 章； 11～13 章；15，16 章 的某些主題。	限於用節點法做 dc, ac, 暫態分析；強調隱含式 積分技巧。

V	2 學季， 20 星期， 3 小時／星期 大四學生	第 IV 課程範圍加上 3 ， 6，7 章；8～1 ， 8～2，8～4， 9～5 各節；第 10 章 ；15，16 章的某些主 題。	第 2 學季包含拼合法， 狀態變數法，連合網路 技巧，以及稀疏矩陣技 巧。
VI	1 學季， 10 星期， 3 小時／星期， 研一學生	快速溫習：1～4 章 ，和第 9 章。 講課：5，6，8， 10，11，12，13 各章 ，以及 15，16，17 章 的某些主題。	星號各節的程式細節可 以指定為期末專題的題 目。

程式 SPARSE 放在第 16 章的附錄也是基於同樣的理由。目前的教科書中很難找到一個 FORTRAN 程式寫得如此簡單，而且能夠把稀疏矩陣技巧的本質描寫得這麼清楚。

林本鎔 於加大，柏克萊

蔡少棠 於普渡大學

各演算法及所在之章次

- 減化矩形矩陣為梯列形式 (3)
- 從相隨矩陣找一樹型 (3)
- 產生根本切集和環矩陣 (3)
- 節點導納矩陣的直接建立 (4)
- 高斯消去法 (4)
- 克勞特 (LU) 分解因數 (4 和 16)
- 牛頓—拉福森演算法 (5)
- 電阻性 n 埠網路的拼合矩陣列式 (6)
- 含有控制電源之電阻性 n 埠網路的限制矩陣列式 (6)
- 一般電阻 n 埠網路的限制矩陣列式 (6)
- 牛頓—拉福森演算法的片斷線性型 (7)
- 片斷線性卡森尼爾生演算法 (7)
- 片斷線性組合演算法 (7)
- RLCM 網路的狀態方程式列式 (8)
- 線性主動網路的狀態方程式列式 (8)
- 線性主動網路的輸出方程式列式 (8)
- $\exp (AT)$ 的計算 (9)
- 利用 $\exp (AT)$, 將狀態方程式轉換成差分方程式 (9)
- Souriau — Frame 演算法 (9)
- QR 演算法 (9)
- 產生一個 $\hat{A}$ 矩陣, 它的特性值是 $H (s)$ 的零點值 (9)

COMPUTER-AIDED ANALYSIS OF ELECTRONIC CIRCUITS

ALGORITHMS AND COMPUTATIONAL TECHNIQUES

蔡少棠

Leon O. Chua

Professor of Electrical Engineering
and Computer Sciences
University of California
Berkeley, California

林本銘

Pen-Min Lin

Professor of Electrical Engineering
Purdue University
Lafayette, Indiana

目 錄

第一章 電子電路計算機分析法大要

1-1 接線板與計算機模擬.....	1
1-2 用計算機模擬做電路分析的例題.....	2
1-3 計算機模擬程式的解剖.....	24
1-4 用線性 n 埠拼合分析作法做方程式列式之一瞥	29
1-5 一些數值積分演算法與它們的數值穩定特性之 一瞥.....	32
1-6 堅挺微分方程式與它們所相關之時間常數問題 的一瞥.....	39
1-7 數值積分演算法誤差分析之一瞥.....	45
1-8 狀態變數的選擇對整個誤差的影響.....	48
1-9 電容和電感的結合性分立電路模型.....	52
1-9-1 推導線性電容的結合性分立電路模型.....	52
1-9-2 推導線性電感的結合性分立電路模型.....	55
1-10 靈敏度分析之一瞥.....	57
1-11 電路分析所用之稀疏矩陣技巧之一瞥.....	63
參考文獻.....	68
習 題.....	68

第二章 電子裝置和組件的計算電路模型

2-1 電路模型和它們的建築方塊—基本集合·····	73
2-2 電路模型的體系和型式·····	76
2-2-1 以訊號振幅範圍表示的模型分類·····	78
2-2-2 以訊號頻率寬表示的模型分類·····	80
2-2-3 模型的體系·····	81
2-3 模型製成的基礎·····	81
2-4 一些物理模型的一瞥·····	86
2-4-1 接面二極體的物理模型·····	86
2-4-2 電晶體的物理模型·····	88
2-4-3 高頻線性小值增幅電晶體的物理模型·····	92
2-5 三端接管裝置之D C全部黑盒模型的合成·····	96
2-5-1 二段平行v-i曲線族的正規黑盒模型·····	101
2-5-2 任意v-i曲線族的正規黑盒模型·····	110
2-6 D C全部黑盒模型轉換成A C全部黑盒模型·····	118
2-6-1 引線電感和包裝電容·····	118
2-6-2 通行電感和電容·····	120
2-7 共多埠電路元件和裝置的黑盒模型·····	123
2-7-1 非理想二埠變壓器的電路模型·····	123
2-7-2 非理想運算放大器的電路模型·····	123
參考文獻·····	136
習 題·····	137