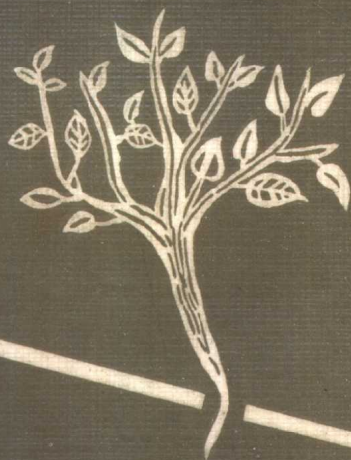


阮馬 德克 W. 曾 森 合著
李 克 D. 賴 勃 曼
宗 義 譯

IBM 電路分析程式 —技巧及應用



協志工業叢書



阮馬李 德克 W. 曾 森 合著
 克 D. 賴 勃 曼
 宗 義 譯

IBM 電路分析程式 — 技巧及應用

協志工業叢書出版股份有限公司

IBM Electronic Circuit Analysis Program

— Techniques And Applications

Original English language edition published by
Prentice-Hall, Inc.

Copyright © 1968 by Prentice-Hall, Inc.

Chinese translation rights held by
Hsieh Chih Industrial Library Publishing Co.,
Taipei, Republic of China

譯 序

科學的發展使得各種專業知識均趨向金字塔式的博大精深。爲了增加這些知識的處理量、處理速度和處理精確度，不得不偏勞電子計算機。這便是晚近各種專業程式崛起的原因。ECAP 是 IBM 公司設計用以分析電路之程式，也可藉著類比的方法來利用它求解控制、機械、液壓、熱傳等系統的問題，費時極短，效果又佳。

尤其在設計前述各類系統時，可以利用此種程式之特性觀察和研究各參數值改變產生的效應、某組件失效後對整個系統的影響、某些組件參數值同時改變之狀況、某些價格昂貴或不易獲致之組件的模擬以及實驗室中費時費事或不易進行的測試等。據此，便可把實驗室中許許多多複雜繁難的測試擺在計算機中做沙盤推演，以期得到合乎要求的最佳設計。

即使在一般的分析問題中，對於較複雜的系統如積體電路設計等，使用此種程式也可節省許多時間。程式設計上，它遠比 Fortran IV 方便甚多，又無需任何程式經驗，故對電機、電子、控制方面的工程人員和學者而言，此種程式確是一個很有效率也很有價值的工具。

本書是以例題的方式來說明 ECAP 的各種設計原則。全書共分三大部份：首先，第一章至第四章是程式設計的基本方法；其次，第五至七章敘述較高深的技巧及 ECAP 的實際應用；最後是附錄，提供一些必要的參考資料。全書內容完整、條理井然，予讀者一種深入淺出的感覺。

筆者不敏，雖編校再三，亥豕魯魚仍所難免，尚望讀者力予指正！

李 宗 義

六十六年青年節於中正理工學院

原 序

本書為學生及工程人員提供了有效運用 IBM 電路分析程式 - ECAP 的必要資料。對於先前並無計算機經驗的讀者，它可以為你介紹 ECAP；對於有經驗的使用者，它是一項易於使用的參考手冊。無論如何，假設讀者具有應用任何標準 ECAP 系統的機會，本書稱得上是完整的資料來源。所謂“標準 ECAP 系統”是 1620、7094 及 360 計算機的程式磁帶。雖然本書主要針對 360 系統，但在附錄中敘述了 1620 及 7094 系統和 360 程式的差異。

本書的目的並不是教以電路理論，雖然使用 ECAP 時或許會在這方面涉及較多。除非是在推導或了解內容中必要的資料，否則不強調程式內部所使用的方法，但是在附錄中含有某些內部運算的簡單描述；這些敘述將會使你對程式內部用以求解的技巧有所讚賞。

本書有三大部份。第一部份，由第一章至第四章，說明程式的基本方法。第二部份，由第五章至第七章，說明較高深的技巧及 ECAP 的實際應用。第三部份是附錄，提供參考資料。

第一章含有介紹性的材料，以使讀者認識 ECAP 的能力及程式的基礎。本章亦描述了大部份資料處理設備的基本作業程序。

第二、三、四章導出用於直流分析、交流分析及暫態分析程式中的基本技巧。在這幾章中介紹了基本的程式設計法並不厭其煩地加以說明。因為每一種程式的特性都儘快地在例題中介紹，讀者應該知道通常在一個例題之後都有一段說明用以澄清例題中不易明瞭的各點。

第五章敘述非程式標準元件之等值電路的推導法。其中含有數個等值電路，諸如大信號荷控電晶體模式及非線性電容等，這些均

作為例題。

第六章含有數個完整的分析例題，用以說明在求解實際電路分析問題中程式的功能與潛力。

第七章說明藉著實際類比的方法將 ECAP 用於求解非電機性之工程問題。所舉例題包括機械、熱傳及回授控制系統。

附錄包含參考資料，諸如常用的電晶體等值電路、有關之程式求解方法的簡短敘述、程式容量之摘要及 ECAP 針對使用者輸入數據之錯誤所產生的錯誤消息一覽表。

每一章均附有問題，這些加強了本書作為教本的用途，時下在學校及工業課程上重視 ECAP 者有增無已。所有問題的解答均在本書末尾，可用作完整的解答手冊。

吾人相信本書適用於各種水準的電機工程課程。在電路的初步課程中或在傳統的分析方法介紹之後，講授 ECAP 本身的使用以作為一種求解技巧是相當值得的。所以，在許多課程中，學生將選用 ECAP 當作獲取各種不同問題解答之最簡單也最有效的工具。教師們將發現 ECAP 能減少對實際問題的厭煩，因而可以有更多的時間去思考觀念和結果。

至於所用的計算機設備，應該注意到，雖然大多數使用者可能使用整批處理輸入卡片疊的設備（如第一章中所述），但在遙控端（諸如電傳打字機或可見顯示裝置）使用 ECAP 的方法實際上仍與此處所述者相同。所以，本書對於所有這些計算機設備均有其價值。

雖然本書一貫採用例題說明的形式而異於傳統，但我們覺得——對於一種實際的、以問題為主的課題如 ECAP 者——此方法尤其有效。要知道，任何非傳統性之出現乃是我們所希望之超水準的副產物。第二、三、四章中的例題係專門為了對 ECAP 技巧做最佳說明而設計；故意將例題儘可能地簡單化，以便讀者能將注意力集中在 ECAP 技巧而非電路操作上。電路的簡單和大小使我們適於核

驗結果。重複使用同樣的例題也是爲了這個觀點。第五、六、七章中的例題則需要對高深而複雜的程式應用做較詳細的介紹。

給使用 ECAP 者一個實際的建議：除非時間充足以實驗，正確達成任務的最快方法是儘量按照本書所敘述的步驟。一旦發生問題，尋找答案的最快方法是研究有關的例題。我們覺得以例題教導的方法（在介紹基本原則時使用者）、實際的裝置模擬技巧及多方面應用上的訓練樹立了本書最重要的特點。

我們希望向 I B M 公司 Howell N. Tyson, Jr., Herb M. Wall, Donald A. Nisewanger, Gerald R. Hogsett, Rosalie Peirce 及 Charles E. Mitchel 諸君致意，他們是 ECAP 的主要發展小組，並在我們 ECAP 的各種工作上賜予合作與鼓勵。我們也要對 Mrs. Sally Chuck 在原稿製作上的協助表示謝意。此外，對 Hughes 飛機公司的計算機應用部、數位電路與支援部及史丹佛大學之計算中心，也要感謝他們的合作與支持。

Randall W. Jensen

Mark D. Lieberman

目 錄

第一章 簡 介 (INTRODUCTION)

- 1.1 電路分析程式之要求 (Requirements for a Circuit Program) 3
- 1.2 何謂ECAP (What is ECAP ?) 5
- 1.3 給初用計算機者的說明 (Comments to First-Time Digital Computer Users) 7

第二章 直流分析 (DC ANALYSIS)

- 2.1 簡化之標準支路 (The Simplified Standard Branch 13
- 2.2 程式編碼簡介 (Coding Introduction) 14
- 2.3 完整的直流標準支路 (The Complete DC Standard Branch) 17
- 2.4 相依電流電源 (Dependent Current Sources) ... 18
- 2.5 靈敏度係數、最差狀況分析及標準偏差之計算
(Sensitivity Coefficient, Worst Case Analysis
and Standard Deviation Calculations) 21
- 2.6 最差狀況解答及偏導數之符號改變 (Worst Case
Solutions and Partial Derivative Sign Changes)
..... 26
- 2.7 輸出之選擇 (Output Options) 29
- 2.8 符號訂定之重點 (Emphasizing Sign Conventions)
..... 33
- 2.9 修正常規 (The Modify Routine) 36

VIII IBM 電路分析程式—技巧及應用

2.10 參數量代 (Parameter Iteration)	37
2.11 修正常規之特殊注意事項 (Special Precautions with Modify Routines)	40
2.12 節點電流之不平衡 [IERROR] (Nodal Current Unbalances [IERROR])	49
2.13 錯誤消息 (Error Messages)	50
2.14 緩衝技巧 (A Buffering Technique)	50
2.15 最差狀況支路電壓 (Worst Case Branch Voltages)	51
2.16 戴維寧等值電路 (Thévenin Equivalent Circuits)	53
2.17 摘要 (Summary)	54
問 題	55
第三章 交流分析 (AC ANALYSIS)	
3.1 交流分析程式編碼簡介 (AC Analysis Coding Introduction)	61
3.2 參數修正及頻率響應之計算 (Parameter Modification and Frequency Response Calculations)	65
3.3 電感性耦合電路 [M卡] (Inductively Coupled Circuits [M Cards])	69
3.4 節點電流之不平衡 [IERROR] (Nodal Current Unbalances [IERROR])	71
3.5 戴維寧等值電路 (Thévenin Equivalent Circuits)	74
3.6 固定頻率下複數 BETA 之模擬 (Complex Beta Simulation at Fixed Frequency)	76

3.7 摘要 (Summary)	79
問 題.....	80
第四章 暫態分析 (TRANSIENT ANALYSIS)	
4.1 暫態分析之編碼簡介 (Transient Analysis Coding Introduction)	81
4.2 時依電源 (Time-Dependent Sources)	92
4.3 連續卡 (The Continuation Card)	93
4.4 開關：電流方向之感應裝置 (The Switch: A Current-Direction Sensing Device)	98
4.5 開關作用時間 [2ERROR] (Switch Actuation Time [2ERROR])	101
4.6 時間間隔之選定 (Time Step Selection)	103
4.7 起始條件解及短路開路指述 (Initial Condition Solutions and the SHORT and OPEN State - ments)	105
4.8 起始條件及起始時間 (Initial Conditions and INITIAL TIME)	107
4.9 平衡解 (EQUILIBRIUM Solutions)	109
4.10 負性元件及非線性模式 (A Negative Element and a Nonlinear Model)	110
4.11 函數之產生 (Function Generation)	114
4.12 摘要 (Summary)	115
問 題.....	116
第五章 模擬技巧 (MODELING TECHNIQUES)	
5.1 簡介 (Introduction)	123
5.2 分段線性模擬法 (Piecewise Linear Modeling)	124
5.3 數學模擬法 (Mathematical Modeling)	137

X IBM 電路分析程式一技巧及應用

5.4 實際類比：分段線性模擬法 (Physical Analogy : Piecewise Linear Modeling)	149
5.5 實際類比：數學模擬法 (Physical Analogy : Mathematical Modeling)	156
問 題.....	176
第六章 實例 (PRACTICAL EXAMPLES)	
6.1 簡介 (Introduction)	179
6.2 複合濾波器：交流分析 (Composite Filter : AC Analysis).....	180
6.3 複合濾波器：暫態分析 (Composite Filter: Tran- sient Analysis).....	188
6.4 數位邏輯倒換器：暫態分析 (Digital Logic-Inverter : Transient Analysis)	196
6.5 10M 赫晶體振盪器：直流分析 (10 MHz Crystal Oscillator: DC Analysis)	212
6.6 10M 赫晶體振盪器：交流分析 (10 MHz Crystal Oscillator: AC Analysis)	230
6.7 10M 赫晶體振盪器：暫態分析 (10 MHz Crystal Oscillator: Transient Analysis)	244
6.8 摘要 (Summary)	252
問 題.....	254
第七章 實際系統之分析 (ANALYSIS OF PHYSICAL SYSTEM)	
7.1 簡介 (Introduction)	262
7.2 控制系統分析 (Control Systems Analysis)	263
7.3 熱傳分析 (Heat-Transfer Analysis)	295
7.4 機械和液壓系統之分析 (Mechanical and Hydraulic	

Systems Analysis)	319
7.5 摘要 (Summary)	345
問 題	345
附錄 (APPENDICES)	
A. 電晶體等值電路 (Transistor Equivalent Circuits)	
.....	353
B. 程式求解技巧 (Program Solution Techniques)	365
C. ECAP 能力摘要 (Summary of ECAP Capabilities)	
.....	387
D. ECAP 輸入卡片格式摘要 (Summary of ECAP Input	
Card Formats)	395
E. IBM 7094 及 1620 計算機之 ECAP 程式差異 (Dif-	
ferences in ECAP Programs for the IBM 7094	
and 1620 Computers)	403
習題解答	405
索 引	448

第一章 簡 介

(INTRODUCTION)

線路設計員所面臨的問題乃是在最低造價下保證電子電路操作時的可靠性。對電路操作之可靠性要求最高的莫過於太空工業，此乃由於太空及軍事上的要求。在這些領域裡，要求電子電路操作情況的高度可靠性是相當必要的。在其他方面的工業裡，諸如電子消費工業，這個可靠性的問題只是要求一個合理的程度——吾人要達到消費者可以接受的最低效能同時也應具有經濟上的競爭條件。因此，在設計電子電路時，必須決定各組件的標準值 (Nominal Value) 和誤差限度 (Tolerance)，這些組件則應該使整個電路在特定的誤差限度內滿足所要求的規格。舉例言之，欲設計一電路使其在最差情況 (Worst Case) 下輸出參數 (Output Parameter) 能具有 $\pm 1\%$ 的誤差限度，若線路中所有的組件都選用誤差限度在 $\pm 0.1\%$ 以內者，以便使整個電路的誤差限度不會超過 $\pm 1\%$ 的規格，這樣，非但不經濟也不實際。此種線路設計的原則通常是不可靠的，且常會用到一些額外的價格較昂而誤差限度較嚴的零件。實際上，欲得一整體誤差限度為 $\pm 1\%$ 者，某些組件或許要具有 $\pm 0.01\%$ 的誤差限度，而另外一些組件却可使用誤差限度是 $\pm 10\%$ 者。

電子電路的設計過程通常均遵循着一個相當標準的步驟 (圖1-1)。欲洞悉在線路設計過程中數位計算機 (Digital Computer) 之用途，試觀察工程師在進行線路設計中所遵循的諸步驟。一旦指定了某項工作計劃，問題可以區分為許多部份，每個工程師被指定

2 IBM 電路分析程式—技巧及應用

去設計並測試一至數個部份。因為整個系統之操作形同一個單元，每一部份必須滿足一組用以定義其操作特性的規格。工程師必須經由分析或實驗的方法來設計該電路，以便於系統組合時能滿足其規格並履行其機能。工程師必須分析電路以決定各元件（Element）之誤差限度、參數變異（Parameter Variations）、功率散逸（Power Dissipation）之影響。爾後再測試電路以便核驗計算是否正確或測量其反應或兩者兼之。如果分析或測試的結果顯示該設計不能滿足電路規格，工程師必須修正該原始設計（或最近一次的修正品）。設計過程是重複的（Iterative）；於此，電路分析程式（Circuit Analysis Programs）便非常有用。

吾人可視電路分析程式為一電子電路模擬器（An Electronic Circuit Simulator），雖然它還能有效地分析其他與電路有相對應之類比關係（Analog）的實際系統。電路分析程式使設計員能在許多方面運用電子計算機的能力。第一，參數改變的影響利用計算機程式來觀察遠比利用實際電路來估計要簡便得多。例如，僅改變一電晶體之集極電容（Collector Capacitance）或 α 截止頻率（Alpha Cutoff Frequency）所造成的影響是很難由實驗來決定的，却可輕易地利用數位計算機來探知。第二，線路設計員可以不必毀去某有關組件而分析出該項組件之失效對整個電路操作的影響。第三，計算機使設計員能探討組件參數的整體效應，諸如最差狀況（Worst Case）等，在實驗室中若非不可能也是相當困難的。第四，程式計劃使吾人能模擬（Simulate）價格昂貴或很難獲致之組件的效應。最後，程式計劃使吾人能利用電路模式（Circuit Model）來進行一般實驗室中不易做的、費時的或儀器昂貴的測量。

電子計算機並未消除實驗室之測試的必要性，但是它確實減少了許多在電路設計中所要進行大量分析和裝配上的時間與煩瑣。在

電路分析上利用數位計算機而獲得許多方面的節省的一個好例子便是積體電路 (Integrated Circuits) 之設計, 其實際線路的生產乃是既費時又耗錢的工作。

1.1 電路分析程式之要求 (REQUIREMENTS FOR A CIRCUIT ANALYSIS PROGRAM)

在未探討 ECAP 之細節以前, 我們首先要討論一個良好的通用網路分析程式 (General Network Analysis Program) 之功能及該程式具有最大用途時所應納入的一些特性。

簡而言之, 通用網路分析程式應該能得到(1)穩定或直流解 (DC Solution) ; (2)交流解 (AC Solution) 以便決定正弦激發 (Sinusoidal Excitation) 下的電路反應 ; (3)暫態解 (Transient Solution) , 以便決定任意時依驅動函數 (Time-Dependent Driving Function) 之時域反應 (Time Response) 。

根據 Kuo 之理論¹, 一個良好的通用網路分析程式應該納入六種特性。第一, 程式應具有簡便的輸入語言 (Input Language) 用以描述線路的圖形、元件的類形及相關的數值。此語言也應描述線路之激發 (Excitation) 、選定分析的類別及進行分析時間或頻率的範圍。此種語言之設計應該讓沒有工程或程式設計知識者也能由所予線路圖而備妥其輸入資料。

第二, 理想的程式應該能夠廣泛地處理各類實際元件之模式。它不但應該能改變元件的參數也應該能改變其圖形上的模式。

第三, 有效地處理活性電路 (Active Circuits) , 分析程式必須能用於非線性的問題。一個線性分析程式不足以求出包含電晶

¹ F. F. Kuo, " Network Analysis by Digital Computer, " Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers, 54, No. 6 (1966), 821.

4 IBM 電路分析程式

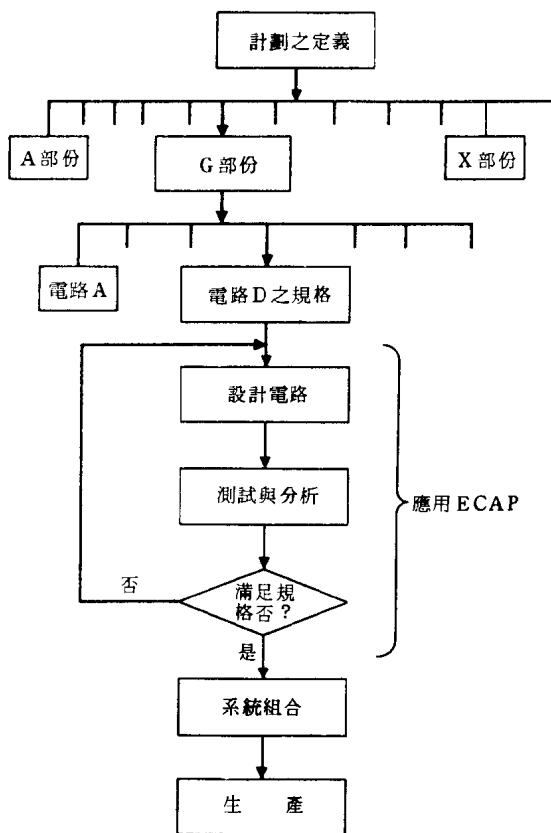


圖 1-1 標準設計程序之流程圖

體而具有非線性負載線 (Nonlinear Load Lines) 之靜態解 (Quiescent Solutions)。它也不適用於分析交換現象 (Switching Phenomena)。因此，吾人希望電路分析程式能利用分段

之線性 (Piecewise Linear) 或稱表列 (Tabular) 的形式或利用數學上的次常規 (Mathematical Subroutine) 來處理非線性的問題。

第四，此種程式應具備許多種輸出的選擇性。輸出應屬以下形式：驅動點或轉移函數 (Driving-Point or Transfer Functions)，散射參數 (Scattering Parameters)，極點與零點 (Poles and Zeros)，大小及相位之響應 (Magnitude or Phase Response)，或暫態響應 (Transient Response)。所計算出的資料應該以一種簡明的格式 (Format) 連同圖形一併輸出，圖形可藉著微片印刷機 (Microfilm Printer)、 $x-y$ 繪圖器 ($x-y$ Plotter) 或陰極射線管 (Cathode-ray) 而顯示出來。

第五，理想的程式應該具有自動修正參數的特性。具此機能，則靈敏度 (Sensitivity)、誤差限度及最差狀況的探討乃得以進行。此一特性，在許多情形下可以取代試驗性設計的實際裝配。

第六，程式必須具有核驗錯誤的能力以便使用者評估輸出的可靠性。

以上所述六點特性乃是由 Kuo 教授摘要地列出對一個有用的網路分析程式的要求。目前有數種程式具有這些特性的大部份；可供設計者使用；我們認為 ECAP 是最著名的一種。

1.2 何謂 ECAP (WHAT IS ECAP ?)

電路分析程式 (Electronic Circuit Analysis Program) 是專為幫助電機工程師設計和分析電路之用而發展出來的一個完整的程式系統。此系統中有四個相關的程式。

輸入語言 (INPUT LANGUAGE) 此程式係使用者與三個分析程式互通信息之用。此語言乃以使用者為主，任何複雜的電路均可簡易地導出其等值電路 (Equivalent Circuits) 藉以向計