

NETWORK ANALYSIS

網路分析

THIRD EDITION

M. E. Van Valkenburg 原著

馮武雄 梁振坤 編譯

大中國圖書公司印行

網路分析

馮 武 雄
梁 振 坤 編譯

大中國圖書公司印行

三 版 序

本書自 1964 年二版發行後積十年的教學經驗及其間教材的演變遂決定出刊三版，本版仍保留二版的基本內容，由於近些年來網路分析內含的不斷增加而益形複雜。本書內容係依電機系之課程編寫，因此各部份大抵均為讀者將來所常用者，並以從淺入深方式編成，俾使與往後課程相銜接，於集總系統分析中特別注重物理系統模型的方程式寫法，而有關狀態方程式之解與 e^{At} (A 為矩陣) 之說明則有待於往後課程中研習之。

附錄 E 含有關計算機指定作業及軟體實驗之參考資料，於各章後均附有計算機之練習問題使得各章內容更見充實。

由於狀態變數日漸重要而特加介紹，熟悉此法後即可學得網路分析之各種方法，然而這並非表示狀態變數法能完全取代其他方法如節點法，讀者在學習此等方法前最好能先熟習一、二種方法，對於初學者則可由傳統之節點與迴路法開始。

本版另加有戴立根定理，此項定理簡易且能廣泛應用於工程上。而二版中所略去之尼奎氏準則則於本版中重新列入，因主動網路日漸重要而尼奎氏準則則為探求主動網路之穩定度之有效方法。

本版亦含有若干新習題而將原有略加修正，且於附錄 G 之解答中亦另外加入以利讀者做獨立之研究。

著者對於讀者、同僚及前輩們之鼎力協助不勝感激並對本書出版有貢獻者在此致謝，最後對內人 Evelyn 之校閱初稿衷心感謝。

Urbana, Illinois

M. E. VAN VALKENBURG

二 版 序

本書可當電機系網路分析教材之用，著者係假定讀者已學過基本微積分。

自首版發行後積十年教學經驗著者覺得網路分析應由所謂的暫態開始而發展至正弦穩態，但並非意指何者為重要，可是讀者乃應由系統之實際了解開始，所以二版的基本內容大致與首版相同。

本書首三章介紹有關電子裝置之電路元件，網路內含及立克希荷夫平衡方程式之法，然後介紹在任意激勵下網路之行爲描述法，而拉普拉斯轉換乃為最有效之方法，由轉換之極點與零點即可得知網路之行爲，再介紹穩態正弦式激勵情形，由此即可研究波德圖、平均功率、加入損失及各種信號譜，由經驗得知只介紹拉普拉斯轉換而不加證明，對初學者並不致有太大的困難，就如懷黑德所說“……真理的證明並不重要乃構成首次的介紹……”。

於首版中利用極點與零點所介紹的 LC 單埠網路，像參數濾波器，各種放大網路及自動控制等，本版中由於極點與零點觀念在課程中已深深地建立，所以將這幾章略去，而以更多例題代入，於首版中有些較為深入的觀念如迴旋、正弦穩態分析，勒史·何維慈準則，傅立葉級數及傅立葉積分等在本版則另加補充材料含雙埠參數、複軌跡及波德圖、平均功率、功率轉移及加入損失，三個附錄為有關複數、矩陣及大小與頻率問題。

文與圖中元件單位除非特別指明外一律為歐姆、亨利、法拉、伏特及安培，還有，數字運算時除了加上積分後可助讀者了解外概以總和

代替微分,同理,變數以 $i(t)$ 代 i , 以 $I(s)$ 代 I 以便指明變數之領域,且大寫字母代表頻率領域下之變數而小寫則為時間領域下之變數。

對於時間領域之代數方程式以次 (Order) 表之,而頻率領域之代數方程式則以階 (Degree) 表之,此用法與現行的工程師技術法相同,對於雙埠網路之轉移函數則以下標 12 表成 Z_{12} , 此亦有人以 Z_T , Z^T 或 Z_{21} 表之,但此等並不易產生混淆,何況將此等下標轉變並非難事。各章後均附有參考資料以利讀者作進一步研習。

著者很榮幸有與學生們一起討論的機會,使得本書之內容次序得以固定,本版修正處係著者於加州大學柏克萊及卡羅德大學擔任客座時完成,謹此對這兩校及伊利諾大學之友人一併致謝。

著者並衷心感謝下列諸友人之鼎力協助使得本書得以完成: Don A. Baker of Los Alamos, Doran Baker of Utah State University, Joseph Chen of IBM, Jose B. Cruz, Jr. of Illinois L. Dale Harris of the University of Utd, Shlomo Karni of the University of New Mexico, Wan Hee Kim of Columbia University Jock Kobayashi of Hughes Aircraft Company, Franklin F. Kno of Bell Telephone Laboratories, Philip C. Magnusson of State University Wataru Mayeda of Illinois, William R Perkins of Illinois Roulald A Rohrer of Illinois, Thomas M. Stout of Thompson-Ramo-Wooldridge Glen Wade of Corucell University, and Philip Weinberg of Bradley University Herbert M. Barnard and Edwin C Joes, Jr. U. L. Everitt and Robert W. New Comb. 最後對於內人 Evelyn 及兒子們的鼓勵與協助致最崇高謝意。

M. E. Van VALKENBURG

Urbana, Illinois

網路分析 目錄

三版序

二版序

第一章 電路觀念之發展

1-1	緒論.....	1
1-2	電荷與能量.....	2
1-3	場與電路觀念之關係.....	6
1-4	電容參數.....	6
1-5	電感參數.....	12
1-6	電阻參數.....	18
1-7	單位與標度.....	21
1-8	物理系統之電路估計.....	23

第二章 網路之描述法

2-1	電流與電壓參考方向.....	35
2-2	主動元件描述法.....	36
2-3	耦合電路點描述法.....	40
2-4	網路之拓撲描述法.....	44

第三章 網路方程式

3-1	克希荷夫定律.....	53
-----	-------------	----

3-2	網路方程式之數目	56
3-3	電源轉換	62
3-4	網路方程式列法之例	67
3-5	迴路變數分析	74
3-6	節點變數分析	79
3-7	行列式：子式與高斯消去法	83
3-8	對偶性	88
3-9	狀態變數分析	90

第四章 一階微分方程式

4-1	一般解與特別解	108
4-2	時間常數	112
4-3	積分因子	115
4-4	較複雜之網路	119

第五章 網路之初值

5-1	何以研究初值	128
5-2	元件之初值	129
5-3	導式之幾何意義	133
5-4	初值條件之求法	135
5-5	網路之初態	140

第六章 微分方程式（續）

6-1	二階微分方程式；內激勵	151
6-2	高階方程式；內激勵	160
6-3	外激勵網路	162

6-4	S 平面根位置與響應之關係	168
6-5	以 ζ, Q 及 ω_n 表示之一般解	173

第七章 拉普拉斯轉換

7-1	緒 論	187
7-2	拉普拉斯轉換	189
7-3	拉普拉斯轉換之基本定理	193
7-4	利用拉普拉斯轉換之解例	197
7-5	部分分式展開法	200
7-6	何比塞展開定理	205
7-7	利用拉普拉斯轉換解法	209

第八章 其他信號波形之轉換

8-1	移位單位步級函數	225
8-2	跳躍與脈衝函數	231
8-3	波形綜合	238
8-4	由 $F(s)$ 求 $f(t)$ 之初值與終值	245
8-5	廻旋積分	247
8-6	廻旋之和表示法	256

第九章 阻抗函數與網路定理

9-1	複頻之概念	272
9-2	轉換阻抗與轉換電路	276
9-3	元件之串聯與並聯組合	282
9-4	重疊與互易	286
9-5	戴維寧定理與諾頓定理	291

第十章 網路函數；極點與零點

10-1	端點對或埠	311
10-2	單埠與雙埠網路函數	312
10-3	網路函數的求法	318
	(1) 梯形網路	318
	(2) 一般網路	321
10-4	網路函數之極點與零點	323
10-5	驅動點函數極點與零點位置之限制	327
10-6	轉移函數極點與零點位置之限制	332
10-7	極點與零點圖形之時間領域特徵	336
10-8	主動網路之穩定性	343

第十一章 雙埠參數

11-1	雙埠變數之關係	364
11-2	短路導納參數	365
11-3	開路阻抗參數	367
11-4	傳輸參數	371
11-5	混合參數	374
11-6	參數值間之關係	376
11-7	雙埠網路間的並聯法	378

第十二章 正弦穩態分析

12-1	正弦穩態	392
12-2	正弦與 $e^{\pm j\omega t}$	394
12-3	利用 $e^{\pm j\omega t}$ 的解法	397

12-4	利用 $Re^{j\omega t}$ 或 $Im e^{j\omega t}$ 的解法	401
12-5	相量與相量圖	404

第十三章 頻率響應圖

13-1	網路函數之主部	417
13-2	大小與相角圖	418
13-3	複數軌跡	421
13-4	S-平面上相角圖	425
13-5	波德圖	435
13-6	尼奎準則	444

第十四章 輸入功率，功率轉移與加入耗損

14-1	能量與功率	472
14-2	有效或均方根值	478
14-3	平均功率與複數功率	481
14-4	最佳功率轉移問題	485
14-5	加入耗損	490
14-6	戴立根定理	493

第十五章 傅立葉級數與信號譜

15-1	傅立葉級數	510
15-2	傅立葉係數之求法	513
15-3	對稱波形與傅立葉係數的關係	518
15-4	截除級數之收斂	526
15-5	傅立葉級數的指數形式	533
15-6	週期信號的穩態響應	538

15-7	週期信號的功率波譜	542
------	-----------	-----

第十六章 傅立葉積分和連續波譜

16-1	重複脈波之波譜波封	553
16-2	傅立葉積分和轉換	557
16-3	網路分析之應用	560
16-4	有用之傅氏轉換	564
16-5	傅立葉與拉普拉斯轉換之關係	571
16-6	波寬與脈波期間	573
16-7	波寬與上昇時間	578

第十七章 基本網路拓樸學

17-1	緒論	588
17-2	定義	588
17-3	定向圖	593
17-4	網路矩陣	595
17-5	網路矩陣間之關係	598
17-6	平面性與對偶性	603

第十八章 網路方程式之矩陣列法

18-1	緒論	616
18-2	迴路方程式	616
18-3	節點方程式	623
18-4	狀態方程式	627
18-5	說明之例題	630
18-6	列狀態方程式之步驟	638

18-7 摘 要	649
----------	-----

附 錄

A 複數代數 (相量)

A-1 定 義	656
A-2 加法與減法	657
A-3 乘 法	658
A-4 除 法	659
A-5 複數之對數	660
A-6 複數的根與冪	660

B 矩陣代數

B-1 定 義	663
B-2 矩陣之加法與減法	664
B-3 矩陣之乘法	665
B-4 其他定義	666
B-5 聯立線性方程式之矩陣解	667

C 標 度

C-1 標度之例題	672
C-2 頻率與大小之標度	673

D 反拉普拉斯轉換表

E 數位計算機習題

E-1 求根之數值方法	681
E-2 數值積分	681
E-3 矩陣列式與矩陣運算	681
E-4 解聯立線性代數方程式	682
E-5 代數運算	682

E-6	一般微分方程式解法	682
E-7	非線性微分方程式解	682
E-8	網路分析	682
E-9	大小與相角製圖計算機求法	683
E-10	參考資料	683
F	參考資料	
F-1	基本或中等的參考書	685
F-2	電路理論之高等參考書	687
F-3	計算機定向式電路理論參考書	689
F-4	裝置模式	690
F-5	系 統	690
F-6	資料背景或具有歷史意義的資料	691
G	部分習題解答	692
索 引		

網路分析

第一章 電路觀念之發展

Development of the Circuit Concept

1-1 緒 論 (INTRODUCTION)

科學方法為利用簡易的理論說明所觀察的事實，而“觀念圖表”(Concept scheme)的名稱最初係由美國化學及教育學家傑姆·康納德 (James conant)¹ 用以說明實驗結果的理論所用表，目前最為科學及工程學者所熟悉的觀念圖表為利用電子和電荷的原子理論，其餘較重要者為能量及電荷的不滅。

雖然電和磁早為人類所知曉——琥珀摩擦生電，羅盤應用於航海中——但直至十九世紀，觀念圖表才較有進展，約在 1800 年，卡文尼 (Galvani) 及 伏德 (Volta) 發現電可由化學方法產生後，遂使實驗過程大大地簡化，其後遂在極短的期間相繼有許多重要的發現，於 1820 年，奧斯特 (Oersted) 證明電流可產生磁場，而安培 (Ampere) 則測量在磁場中由電流存在所產生的力量，在 1831 年法拉第 (Faraday) 和亨利 (Henry) 發現了電感應。此等實驗在 1873 年由英國物理學家馬克士威 (James Clerk Maxwell) 歸集一起而成了相當有用的觀念圖表，在馬克士威方程式中有如其觀念圖表所顯示的，所有

¹ James B. Conant, Science and Common Sense (Yale University Press, New Haven, Conn. 1951).

電和磁所產生的現象皆可由電荷和電流所產生的場加以解釋，而馬氏的觀念圖表則可由近百年來由馬氏方程式所導出的現象均與實驗相符合之事實而獲得證明。

既然馬氏成功地解釋電和磁，何以還需要對同一現象做另一種觀念圖表的探討呢？而此兩種觀念又如何相連呢？第一個問題的答案為：電路觀念的實際利用乃是我們現在所要討論的主題。事實上，我們並不同電壓和電流一樣地對電場感興趣，由於利用電壓和電流的電路觀念不但幫助電路的分析而且在必要時尚可由此導出其餘物理量——諸如電荷、電場、能量及功率等。第二問題的答案較冗長而且需要判斷。簡言之，電路觀念的發展係基於和馬氏方程式相同的實驗事實。然而電路所做的估計並不包含於場理論的觀念中，更重要的是在發展電路理論前我們必須了解在電路觀念中所做估計的性質——此等性質即包括了對電路理論所能應用範圍的限制。

現在以兩個基本結構方塊定義電路函數：電荷和能量。視電荷和能量為最不普遍的因子以描述電的現象，利用此等基本量即可建立電路的基本觀念圖表，物理電路乃為互接的儀器系統。此地我們利用儀表 (Apparatus) 這個字代表所有的能源、連接線、電路元件及負荷等，而電路即用以轉移或轉換能量，電荷的轉移伴隨著能量的轉移，在電路中能量由供給點（電源）轉移至負荷（或漬），在轉移過程中能量可被儲存。

1-2 電荷與能量 (CHARGE AND ENERGY)

在西元前 600 年，希臘人發現和絲綢或貓皮摩擦過的琥珀帶有電，而能吸引小針片，後來法國的庫倫 (Coulomb) (及英國的卡文狄西 Cavendish) 亦利用同樣的方法建立了電荷吸引力的平方反比定律。

目前我們對電荷的了解乃基於原子理論的觀念圖表，在原子理論

中原子係由周圍環繞帶負電荷的電子而本身帶正電荷的原子核所組成，在中性原子中，原子核所帶的正電荷和電子所帶的負電荷數目相等，當電子由該物質移去後，該物質即帶有正電荷，若物質帶有過多的電子則該物質即具有負電性。

電荷的基本單位為電子之電荷，在MKS 單制制中，電荷的單位為庫倫 (Coulomb)，而電子帶有 1.6021×10^{-19} 庫倫的負電荷。

電荷在電路中由一點轉移至另一點的現象即構成電流 (Electric current)，電流可以被定義成電荷經由某一截面而運動的淨時間變化率，電子在金屬內的混亂運動除非產生淨電荷轉移否則並不構成電流。

以方程式表示時，電流² 為

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

若電荷 q 的單位為庫倫而時間 t 為秒，則電流的單位為安培 (Amperes) (紀念法國物理學家安培 Andre' Amp'ere)。因電子電量為 1.6021×10^{-19} 庫倫，因此一安培相當於每秒有 $1/(1.602 \times 10^{-19}) = 6.24 \times 10^{18}$ 個電子通過截面。

由觀念圖表的理念，所有物質皆由原子構成，在某固體中，有些電子受原子核正電荷的吸力很小而能自由運動，此等電子為區別起見特稱之為自由電子 (Free. electrons)，如圖 1-1 所示電流即為此等自由電子由一個原子至次一個原子的流率。

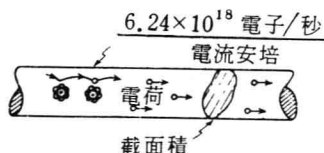


圖 1-1 電荷在導體內的運動

² 電流符號 i 取自法文 *intensité*

在某些材料內含有許多自由電子，因此很容易得到大電流，此等材料稱為導體 (Conductors)，大部分金屬及某些液體為良導體，另外某些材料內所含自由電子數極少，此等材料稱為絕緣體 (Insulators)，通常用絕緣體包括玻璃、雲母和塑膠等。其餘的物質稱為半導體 (Semiconductors)，如在電子學裏伴有相當重要的角色，常用的兩種半導體為鍺 (Germanium) 和矽 (Silicon)。

常有一種不正確的觀念謂：因為電波在導體中大約以光的速度運動，因此電子在導體內亦以相同的速度運動。實際上電子在導體內的漂移速度僅為每秒幾毫米而已！（見實例請習題 1-2）。

我們所考慮的另一觀念圖表為能量不減 (Conservation of energy)，經過科學訓練的人可能立即懷疑任何需要自生能量的觀念圖表，能量不減定律謂能量不能被產生亦不能被破壞，但可轉變形式，電能乃由他種能量轉變而成，有許多方法達到此目的，諸如：

(1) 電機械能量轉變 (Electromechanical energy conversion)。在 1831 年法拉第發明轉動發電機使電能可由機械能轉變而成。通常機械能係由熱能經由渦輪 (Turbine) 轉變而成，而熱能則由燃料的燃燒或原子核燃料轉變而成，有時轉變可由水電產生水壓能達成。

(2) 電化學能量轉變 (Electrochemical energy conversion)。電池將化學能轉變為電能，此等電池將來可望廣泛用於電動汽車中，燃料電池亦屬於這一種。

(3) 磁流力式能量轉變 (Magnetohydrodynamics energy conversion)。此等裝置可將高速離子氣體的機械能轉變為電能。

(4) 伏打能量轉變 (Photovoltaic energy conversion)。此等裝置能將光能直接轉換為電能，其中最著名的裝置稱為太陽電池 (Solar cell)。

對能量和電荷而言，此等電能源的作用相同，例如電池，兩個金