

大專用書

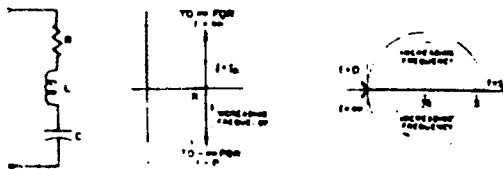
電 路 學

鄭坤輝

李齊海

蔡丁元

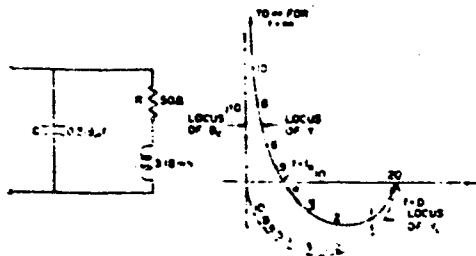
編譯



INTRODUCTION TO ELECTRICAL CIRCUIT ANALYSIS

Robert C. Carter

SOUTHERN TECHNICAL INSTITUTE



前鋒出版社印行

大專用書

電 路 學

鄭坤輝 李齊海 蔡丁元
編譯

前鋒出版社印行

本社業經行政院新聞局核准登記局版台業字第一四〇〇號

版權所有



翻印必究

1. 本社出版之書籍，均與編著人及著作人簽有版權處理契約，保有著作人之原稿；爲防止盜印，分別加蓋本社或作者印章於版權之上，以資辨識。
2. 本社出版物，除函購及直接批購外，係委託特約之書局，本社發行組均列冊存記，藉資徵信。
3. 未經本社委託而擅自買賣本社出版物之團體或個人，即屬盜印，一經發現，當即公開警告，依法訴究。
4. 本社爲維護正當出版權益，歡迎同業及讀者，惠賜檢舉盜印者，一經證實，當即致奉重酬。

發行人：鄒金銓
發行所：前鋒出版社
地址：台北市汀州路七一二號之二
電話：3935878

郵政劃撥：第107669號 前鋒出版社收
總營業所

地址：基隆市義二路四六號
電話：032～223522，229825

郵政劃撥：第105997號 鄒金銓收
基價：4元

中華民國 67 年 8 月初版
中華民國 年 月二版

序 言

電路學對於工科的學生相當的重要，對電機、電子科系的學生及工程師更不用說了，但是要把電路知識的灌輸給學生，無論是書本或是教師們都得花費相當的工夫以講求技巧，Carter 電路學在課程的描述中，力求採用數學的觀念來表達物理意義，引發學生潛在的智能，而且將計算的過程，盡量說明出來，便利學生自修研習。在原作者的觀念中，學生多作習題是一種必要的學習步驟，因此本書供應的習題很多，足供教師挑選作為學生課後練習之指引。

本書之能由預官考選委員選為電路學指定用書，除了內容充實之外，觀念之描述易於接受，亦是一個重要的原因，教師讀者採用本書，可以欣賞其觀念之表達方式，並得到所需的電路知識。

本書編寫力求慎重，希望能以流暢的文字，易於辨讀的插圖提供給讀者，然經過多次校對之後，可能仍存留有錯誤，敬望讀者先進惠予指引，俾再版時得以修正，謝謝！

譯 者

鄭 坤 輝

1978 年 7 月

原作者序

根據統計資料，一工程師大約需要五至八個技術員來配合。據目前情勢看，工程師及技術員之需求量正繼續增加中。技術員在應用及操作方面非常精專，其知識及經驗不需唸四年大學方始獲得，二年制的工業專科學校就是爲了彌補大學畢業生及高工畢業生間的空隙而設立的，二專畢業生不但懂得怎樣做，並且要懂得爲何要這樣做。

在電路學方面，雖然已有許多優良的書，但仍缺一本注重需時效精確性及具嚴肅性足供高工畢業生進修及二專在學學生的書，本書即爲彌補此種缺憾而寫。本書特別注重如何解問題及應用技術之基礎。一般說來，初學的學生向學心很強，關於電機方面的現象及原理都有強烈的求知慾。可惜，這種學習精神常因簡單問題得不到正確的答案而灰心受到挫折。故應使學生養成用數學解答問題的習慣並提供基本技術，這些工作對初學的學生越早進行越好。

本書希望給予將進入電機工程界任一部門，比如遙控、雷達、通訊、電話、電力、儀表、電子計算機等等的學生所需的電路觀念，因二專修業期間只有兩年，學生們沒有時間先學相關數學知識才進入工程園地，欲在兩年內產生優秀的技術員，學生和老師都需重視上述事實。

我們大家必需承認，進入二專的學生們的主要目的並非研究電路學中的數學問題。我們希望讀者已研習過算術、代數、幾何、三角及簡單的微積分。根據經驗，學生們對這些功課雖已學過，但尚無法純熟的將這些數學觀念應用到電路中去。因此，本書在解問題時力求不厭其詳地反覆說明，期使讀者能將數學和電路連貫起來。我們大家也需承認有下列的事實，那就是：有些學生採用死記的方式背誦每一問題所需要的方程式。本書對這方面已加以注意防範，即本書有許多問題並非代入方程式就可求解，必需對問題有徹底的了解，發掘到所據

的原理，然後才能得到求正確答案的方法，本書對一問題先用一般方法求解，再用比較進步的工程方法求解，以顯示工程方法之簡明。

本書對數學計算結果亦作物理性的描述，以使學生們知道那種數學型式代表那種元件，如電線、開關、電阻器、電容器、線圈、真空管、電晶體、二極體等等。

除了高中所學外，希望學生們先再多學些電學。對力學下些功夫是有幫助的，微積分在解題方面很有幫助，讀者應具良好微積分基礎。對於暫態現象及非正弦波，本書係以實用為基礎，恐增初學者困擾，故這些東西從略。

本書為一兩學期課程，可與電子學、物理學、數學等相關科學同時講授以收效果。

本書將交流電路及直流電路分開。在此書中，視直流電路為交流電路中之一特例，亦即是說，本書將直流電路理論包括在交流電路理論中。

在每章末都有提要及習題，習題大部分供一般讀者練習用，有一部分習題則供程度較高者鑽研用，一般而言，每種習題總是多寫幾題，以供教師在不同的班級指定不同的習題。奇數習題的答案，列於本書之末。作本書習題時只需達到計算尺的準確度即可。計算結果有相當程度的精確性而計算速度夠快，是我們努力的目標。

本書之特點在於以較具體之觀念將初學者引上軌道，然後依個人所選之園地繼續深造。

Robert C. Carter

目 錄

第一章 單位、因次和冠首詞	1
§ 1-1 概 述	1
§ 1-2 基本單位	1
§ 1-3 冠首詞	3
§ 1-4 符 號	7
§ 1-5 單位和因次	8
§ 1-6 電 荷	9
§ 1-7 電 流	9
§ 1-8 位 差	10
§ 1-9 功 率	11
§ 1-10 單位轉換	12
§ 1-11 摘 要	14
第二章 六個基本定律	21
§ 2-1 電 阻	21
§ 2-2 電阻係數	23
§ 2-3 線 表	27
§ 2-4 溫度效應	32
§ 2-5 歐姆效應	35
§ 2-6 克希荷夫電流定律	37
§ 2-7 克希荷夫電壓定律	38
§ 2-8 參考方向和規定	40
§ 2-9 電 容	45
§ 2-10 電 感	49
§ 2-11 功 率	51

§ 2-12	電 源	52
§ 2-13	串聯元件	55
§ 2-14	並聯元件	55
§ 2-15	摘 要	56
第三章	簡單要路	63
§ 3-1	理想化	63
§ 3-2	波 形	64
§ 3-3	正弦波	65
§ 3-4	相位移	68
§ 3-5	電阻中之交流電流	71
§ 3-6	電容中之交流電流	74
§ 3-7	電感中之交流電流	77
§ 3-8	電 導	79
§ 3-9	RL 串聯電路	79
§ 3-10	阻 抗	80
§ 3-11	G, C 並 聯電路	82
§ 3-12	R, C 串聯電路	84
§ 3-13	R, L 和 C 串聯電路	85
§ 3-14	對偶性	87
§ 3-15	新的分析工具	88
§ 3-16	摘 要	89
第四章	複 數	93
§ 4-1	複數面	93
§ 4-2	相量, 向量和純量	93
§ 4-3	直角座標型式	94
§ 4-4	極座標型式	95
§ 4-5	直角座標與座標之轉換	96
§ 4-6	相量加法及減法	97

§ 4-7	直角座標形式的乘法與除法	99
§ 4-8	極座標形式的乘法和除法	100
§ 4-9	相量的旋轉	101
§ 4-10	指數型式	102
§ 4-11	指數型式的乘法與除法	104
§ 4-12	相量之乘方與根	105
§ 4-13	其他象限中的複數	106
§ 4-14	相量之共軛、倒數及反向	108
§ 4-15	摘 要	109
第五章	有效值及平均值	113
§ 5-1	有效值	113
§ 5-2	平均值	118
§ 5-3	整 流	119
§ 5-4	有電池負載之整流	120
§ 5-5	波形因數	126
§ 5-6	波峰因數	127
§ 5-7	儀 器	127
§ 5-8	串聯電路的伏安	130
§ 5-9	並聯電路的伏安	133
§ 5-10	功率因數和無功率因數	135
§ 5-11	負載相加	136
§ 5-12	摘 要	139
第六章	單源網路分析	145
§ 6-1	分 壓	145
§ 6-2	分 流	147
§ 6-3	等效阻抗和等效導納	149
§ 6-4	串聯和並聯等效網路	150
§ 6-5	頻率變化時之等值電阻	153

§ 6-6	實功分量和虛功分量	154
§ 6-7	網路之簡化	158
§ 6-8	功率因數修改	160
§ 6-9	阻抗轉換	164
§ 6-10	π 型和 T 型轉換	169
§ 6-11	三端網路	171
§ 6-12	多端網路	174
§ 6-13	電 橋	176
§ 6-14	階梯法	177
§ 6-15	網路之標準化	179
§ 6-16	應用和例題	180
§ 6-17	摘 要	188
第七章	諧 振	199
§ 7-1	串聯諧振	199
§ 7-2	阻 抗	200
§ 7-3	接近諧振的阻抗特性	201
§ 7-4	接近諧振的電壓特性	203
§ 7-5	頻帶寬	207
§ 7-6	可變電阻	211
§ 7-7	分貝衰減	213
§ 7-8	可變電容	216
§ 7-9	可變電感	219
§ 7-10	Q 表	221
§ 7-11	並聯諧振；可變頻率	222
§ 7-12	諧振阻抗	227
§ 7-13	可變電容	230
§ 7-14	可變電感	232
§ 7-15	可變電阻	232

§ 7-16	多諧振電路	233
§ 7-17	線圈的自諧振	235
§ 7-18	頻率和阻抗之估計	240
§ 7-19	摘 要	241
第八章	圖解法	247
§ 8-1	概 述	247
§ 8-2	複數阻抗平面	247
§ 8-3	複數導納平面	249
§ 8-4	倒數軌跡	249
§ 8-5	直線的倒數	251
§ 8-6	圓的倒數	254
§ 8-7	一般定理	257
§ 8-8	電路上的應用	259
§ 8-9	移相網路	269
§ 8-10	可變頻率	271
§ 8-11	軌跡族	272
§ 8-12	摘 要	274
第九章	多源網路的分析	279
§ 9-1	定 義	279
§ 9-2	支路法	280
§ 9-3	迴路法	282
§ 9-4	標準符號法	285
§ 9-5	功率的方向	291
§ 9-6	重疊定律	292
§ 9-7	戴維寧定理	295
§ 9-8	諾頓定理	299
§ 9-9	密爾門定理	304
§ 9-10	互易定理	306

§ 9-11	節點法	307
§ 9-12	補償定理	310
§ 9-13	代換定理	312
§ 9-14	最大功率轉換	314
§ 9-15	最大功率轉換	316
§ 9-16	摘 要	329
第十章	變壓器	331
§ 10-1	互 感	331
§ 10-2	耦合係數	332
§ 10-3	反射阻抗	333
§ 10-4	調諧變壓器	335
§ 10-5	臨界耦合	336
§ 10-6	頻率響應	337
§ 10-7	鐵心變壓器	338
§ 10-8	損失的測定	341
§ 10-9	效 率	342
§ 10-10	最大效率	345
§ 10-11	全日效率	346
§ 10-12	標公值	347
§ 10-13	電壓調整率	347
§ 10-14	自耦變壓器	348
§ 10-15	相位試驗	350
§ 10-16	變壓器的並聯運用	350
§ 10-17	多繞組變壓器	356
§ 10-18	摘 要	357
第十一章	不平衡多相系統	358
§ 11-1	緒 言	359
§ 11-2	使用多相系統的原因	367

§ 11-3	三相電壓的產生	368
§ 11-4	三相接線	369
§ 11-5	相阻抗	374
§ 11-6	例 題	375
§ 11-7	並聯負載	378
§ 11-8	功率因數修改	381
§ 11-9	線路壓降	383
§ 11-10	三相及四相系統	384
§ 11-11	變壓器連接法	387
§ 11-12	司考特接法	394
§ 11-13	瓦特表法	400
§ 11-14	多相整流器	408
§ 11-15	摘 要	410
第十二章	不平衡三相系統	421
§ 12-1	不平衡三相系統	421
§ 12-2	不平衡 Δ	421
§ 12-3	不平衡之四線	424
§ 12-4	不平衡三線式	426
§ 12-5	相序指式器示	432
§ 12-6	在不平衡系統中瓦特表之測量	434
§ 12-7	不平衡的兩相系統	437
§ 12-8	電源阻抗之效應	438
§ 12-9	摘 要	441

第一章 單位、因次和冠首詞

§ 1-1 概述

伏特、安培、歐姆、瓦特、焦耳、法拉第和往日的許多偉大先驅們，爲工程紀元奠定了相當的基礎。像火箭、飛彈、人造衛星、微波、雷射、計算機、電晶體等無數的事物，在今天我們都已認爲是很平常的東西。然而，電機科學發展的基礎，却是我們將在第二章所詳細討論的一些基本的物理定律。

在我們學習如何運用這些基本定律到現代的工程事物之前；我們必須用工程術語，創立一種共通的方式來做物理和數學世界的溝通工作。這需要將定義、數學過程和符號，以及工程術語等，逐一詳細的介紹。每一個本書所用的新名詞，都先經過嚴密的定義，而它們大部分都可在附錄 1 中查到。

當讀者們研讀本書之時，應下工夫去切實了解所有定義的意義；然後不停地複習舊的觀念，看看能否找出舊與新的關係。由於初學者對於工程術語的意義和物理量間基本關係的數學模式都不熟悉，免不了會遭到許多困難。

對於本章的基本主題業已熟悉的讀者，也可略讀一遍做爲複習。而在本章中找得到新東西的讀者，就必需仔細地來學習定義、數學符號、和數值運算的技巧了。

§ 1.2 基本單位

爲了要使科學家、工程師和技術員能夠和諧地在物理世界中工作；他們對於某些特定量爲多少的量測，必須有一種可共通的方法。譬如說，假使我們希望駕車從一城到另一城旅行，首先我們想要知道需

要走多遠。因而我們需知道關於距離的兩件事（被量測的物理量和表示），即數量和單位，如 50 哩。同樣的距離，我們也可用吋、碼、或公尺來表示，而每一種都有不同的數字來與 50 哩相等效。

在美國，大部份的場所都使用英制：1 碼 3 呎，1 呎 12 吋，1 哩 5280 呎，1 加侖 4 qt，1 磅 16 oz，等等。由於這些測量彼此間並非十進制，在我們做單位轉換時，將會增加困擾。基於這個理由，幾乎所有科學和工程上的工作都實行公制，使用三個基本單位和一套冠首詞。

公制和英制兩種系統都有三個基本物理量，它們的單位都經過精密地定義，而被公認做為標準。這些單位是做為長度、質量和時間的因次。由於我們主要的重點在電機工作上的測量，我們就直接將重心轉移到有理化MKS制（meter, kilogram和second）。

它們的第一個單位：公尺，定義為氬 86 的橙色線的輻射波長。雖然它正確的長度，對我們目前並不重要；但我們仍需想像一下它近似的大小，如此我們也可繼續來感覺出伏特、瓦特等的大小概念。一公尺大約為 39.37 in。

MKS 制的第二個單位為質量的單位：千克（kg, 1000g），定義為放在法國 Sevres 國際度量衡標準局中一塊白金的質量。一千克大約為 2.205 lb。為了使電機上的單位簡化成不帶數值係數，質量用力的單位牛頓來表示。牛頓為千克·公尺/秒²（kg·m/sec²）近似於 0.1020 kg 或 0.2248 lb；我們將在 1-5 節中進一步的討論它。

秒為MKS制中的第三個單位，它是根據 1900 太陽年來的精密定義的，它在公制和英制單位是共通的。每一個人對於秒、分、時的長短可能都已熟悉。但這一點還需注意：雖然幾乎所有的公制系統為十進制的關係，但在時間方面仍然是 1 分 60 秒，1 小時 60 分，一天 24 小時。

§ 1-3 冠首詞

對於這點，讀者們必須清楚分辨三件事：量的符號、被測量的單位、單位的縮寫。例如， P 為功率量的符號，而功率的單位可能是馬力 (hp)，瓦特，Btu/hr，和其他。一個單位的縮寫必須僅用於和數字相連時，如 10 kg、5 hp、或做表格時爲了節省空間。附錄 2 中編纂了一些最常用的量，它們的符號和單位。

表 1-1
公制系統冠首詞

冠首詞	符號	乘數	發音
atto	a	10^{-18}	āt'tō
femto	f	10^{-15}	fēm'tō
pico	p	10^{-12}	pē'cō
nano	n	10^{-9}	nān'ō
micro	μ	10^{-6}	mī'krō
milli	m	10^{-3}	mī'lī
centi	c	10^{-2}	sēn'tī
deci	d	10^{-1}	dēs'ī
deka	da	10^1	dēk'ā
hecto	h	10^2	hēk'tō
kilo	k	10^3	kīl'ō
meg.	M	10^6	mēg'ā
giga	G	10^9	jī'gā
tera	T	10^{12}	tēr'ā

使用公制系統最大的好處之一爲可使用十進制的冠首詞（見表 1-1）。讀者們必須透澈地熟悉這些冠首詞須永遠隨著一個單位。舉例而言：40 pf (40×10^{-12} f，或 0.000000000040 f)，5 cm（5 公分或 0.05 公尺），25 nsec (25×10^{-9} sec，或 0.000000025 sec）。由此可發現，寫成 40 pf 比 40×10^{-12} 或其他形式更爲迅速和方便。有時爲了方便或有需要時，將一數值量以小數（小於 1）來表示，如 0.05 公尺。通常它唸成“零點零 5”，這要比“百分之五”來得簡便和直接了。

簡化使得事情方便，使用適當的冠首詞和小數點的運用，能避免寫大於 1 千或千分之幾以下的數字。例如：7 MHz 可代替 7,000,000

Hz ; $0.05 \mu\text{f}$ 或 50nf 代替 0.00000005f ; 75kW 代 $75,000 \text{W}$ 。在這裡值得一提的是冠首詞如此的用法，祇爲了表明單位，並不成爲單位的一部分。例如， 12cm 意即 0.12m ; 它的單位仍是公尺 (m)。這在我們僅僅讀一個數值時是無關緊要的；而當我們需要數值計算時，記得將冠首詞和單位分開，這點是很重要的。在書中有不少的例子都說明了這個觀念。

因爲這些冠首詞本身即有 10 的乘方之意，要小心別養成寫 10 的乘方形式的習慣；然後，我們代入正如已知的冠首詞形式。舉例言之，設我們欲計算一長爲 5cm 寬爲 2mm 的長方形的面積。首先，我們需用符號寫下面積的方程式，也就是面積等於長乘寬。

$$A = LW$$

此處的 A 代表面積， L 代表長， W 代表寬。現在我們將已知代入方程式：

$$A = LW = (5 \text{cm})(2 \text{mm}) = 100 \mu\text{m}^2$$

此乃應實際寫出者之全部。而心算之過程如下： 5cm （在此雖未寫出但記得要乘 10^{-2} ）乘上 2mm （需乘 10^{-3} ）得到 10 平方公尺乘以 10^{-5} ，也就是 100×10^{-6} 平方公尺，或說是 $100 \mu\text{m}^2$ 。注意，此處之 μm^2 並不等於 $(\mu\text{m})^2$ ；前者爲 10^{-6}m^2 ，而後者是 10^{-12}m^2 。

這些在做數值計算時，處理冠首詞、乘數、及單位的基本程序，需能運用自如，以便我們的題目更複雜、數字更增大時，也不致落入耗時且計算繁複的泥沼。包括電路在內，幾乎所有的數值計算，都希望在合理的誤差和最低的人爲錯誤下，達到迅速的目標。

例 1-1 計算一圓柱體之體積，其直徑爲 15cm ，高爲 140mm 。

解：一圓柱體之體積等於截面積乘以高；以符號表之爲，

$$V = AH$$

在此 A 爲圓之面積等於 $\pi D^2/4$ ， D 爲圓之直徑； H 在此代表高。

聯合兩方程式，我們可得