

部定大學用書

電 工 學

—電機電子工程學—

(上 冊)

國立編譯館大學用書編審委員會主編

張 煜 編 著

國立編譯館出版
臺灣中華書局印行

中華民國六十九年八月三版

部定大學用書
電 工 學 (上冊)

——電機電子工程學——

平裝一冊基本定價肆元肆角正

(郵運滙費另加)

主 編 著 者

國立編譯館大學用書編審委員會
張

發 行 人

臺灣中華書局股份有限公司代表
熊 鈞 生

本 書 局 登 記 證 字 號
發 行 處 者

臺北市重慶南路一段九十四號
行政院新聞局局版
臺業字第捌叁伍號
臺灣中華書局印刷廠
臺 灣 中 華 書 局

臺北市重慶南路一段九十四號
郵政劃撥帳戶：三九四二號
Chung Hwa Book Company, Ltd.
94, Chungking South Road, Section 1,
Taipei, Taiwan, Republic of China



(臺總) 戊 華

著者序

本書電工學係應國立編譯館邀請而編著。現因科學發展，時代進步，電工學之內容必須包含甚多電子方面之學識，故改爲電工學——電機電子工程學，較爲明確適當。

本書分爲六篇，計第壹篇電路理論，第貳篇電機機械，第叁篇電子學，第肆篇控制系統，第伍篇電子儀表，第陸篇電子計算機，共計三十八章。其編撰特點計有：

一、一般電工學僅包括電路理論、電機機械。較新的電工學有包括部分電子學者，亦有再包含控制系統及部分電子儀表者。作者鑒於電子計算機之應用日廣，及實驗與理論應予並重，除電路理論、電機機械、電子學、控制系統、電子儀表外，另再增加電子計算機壹篇，及另撰編電工學—電機電子工程學實驗，與之配合。

二、第壹篇電路理論所含有之各種電路定理，較其他書籍爲多。

三、第貳篇電機機械編撰精縮，而仍包含各種發電機及電動機。

四、第叁篇電子學着重於電晶體電子學，其中幾包括所有各種基本電子電路。對於特種電子電路之編撰，更爲特出。

五、第肆篇控制系統爲其基本理論之撰述。

六、第伍篇電子儀表着重於實驗室中常用之電子儀表撰述外，尙有其他各種機械、速度、時間、聲響、光度、壓力、溫度等測量。

七、第陸篇電子計算機包括類比計算機與數位計算機兩種。尤其對於數位計算之內部結構，分章精撰敘述。

八、本書內容有部分係採用作者近年來在中外著名雜誌所發表之論文，資料新穎。

本書可作大專學校教科書。如機械系採用，則四個學期可以教完。較目前各大學機械系之電工原理、電工學、電子學諸課程，所授時間相同，而教材內容則超過之。如電機系採用，則包括目前各大學電機系之電路、電機機械、電子學、控制系統、電子儀表學、電子計算機原理等諸課程。如其他化工系、土木系採用，可以選擇所需章節講授。

本書費時二十個月撰寫完成。此處須感謝吾妻姜普華之恒久鼓勵。此外，國立交通大學張教務長去疑兄在百忙中抽暇校閱，國立編譯館劉館長拓與謝編審端霞之熱忱關注，謹此表衷心感謝。

張 煌

民國六十一年六月

於國立台灣大學電機系

電 工 學

總 目 次

上冊： 第一篇 電路理論

第二篇 電機機械

中冊： 第三篇 電 子 學

下冊： 第四篇 控制系統

第五篇 電子儀表

第六篇 電子計算機

電 工 學

上冊目次

著者序

第一篇 電路理論 1

第一章 直流電路 1

1-1 功、能和功率 1

1-2 電荷 4

1-3 電流 6

1-4 電壓、電動勢和電位差 9

1-5 電功率和電能 14

1-6 電阻和歐姆定律 18

1-7 串聯電路 24

1-8 並聯電路 25

1-9 電池的串聯和並聯 29

1-10 克希何夫定律 33

1-11 複合直流電路 39

1-12 電網簡化 43

問題 49

第二章 交變電流和電壓 56

2-1 電壓和電流波形 56

2 電工學

2-2	傅立葉級數、諧波	58
2-3	正弦電壓和電流	65
2-4	純電阻性交流電路	71
2-5	電壓和電流的平均值和有效值	73
2-6	電感	77
2-7	純電感性交流電路	81
2-8	電容	86
2-9	純電容性交流電路	90
	問題	94

第三章 複數代數 99

3-1	複數及其標記法	99
3-2	複數的直角坐標及其運算	102
3-3	複數的極坐標及其運算	106
3-4	複數的指數形式	111
3-5	電壓和電流向量及其加法	113
3-6	阻抗概念	118
3-7	導納	122
	問題	124

第四章 交流電路 126

4-1	RL 串聯電路	126
4-2	RC 串聯電路	131
4-3	RLC 串聯電路	134
4-4	並聯電路	139
4-5	串並聯電路	146
4-6	電功率	149

4-7	頻率響應及諧振	154
4-8	四端點網路	164
4-9	最大功率情況	170
	問題	172
第五章	網路理論	182
5-1	環電流法與節電壓法	182
5-2	重疊定理	188
5-3	互易定理	192
5-4	代替定理	196
5-5	米耳曼定理	198
5-6	戴維寧定理	200
5-7	諾吞定理	205
5-8	米勒定理	207
5-9	補償定理	209
5-10	最大功率轉移定理	214
5-11	有源 ∇ -Y變換	218
	問題	224
第六章	單相和三相電路	234
6-1	功率和無效功率	234
6-2	功率因數和視在功率	239
6-3	功率因數校正	243
6-4	三相電路	244
6-5	三相電壓、電流和功率	249
6-6	Y連接電路	253
6-7	∇ 連接電路	259

6-8	∇ - Y 等效	260
6-9	三相制分析	261
6-10	其他多相制	264
	問題	264
第七章 暫 態		270
7-1	電的暫態	270
7-2	所加電壓恒定時的 RL 暫態	273
7-3	所加電壓恒定時的 RC 暫態	277
7-4	時間常數	279
7-5	LC 電路, 振盪	281
7-6	交流暫態	288
7-7	暫態響應和頻率響應間的關係	291
	問題	293

第二篇 電機機械 299

第八章 磁 路 299

8-1	電流的磁效應	299
8-2	磁路概念	302
8-3	磁化曲線	306
8-4	磁性材料特性	308
8-5	實用的磁路	314
8-6	用直流激磁的磁路	316
8-7	磁力及其應用	321
8-8	磁感應電壓, 自感	323
8-9	用交流激磁的磁路	326

8-10 磁滯和渦流損失.....	328
8-11 鐵心電抗器.....	330
問題.....	331

第九章 變壓器 337

9-1 變壓器的原理.....	337
9-2 理想變壓器.....	338
9-3 磁漏電抗.....	344
9-4 實際變壓器等效電路及向量圖.....	345
9-5 等效電阻和電抗.....	348
9-6 短路和開路試驗.....	352
9-7 調整率和效率.....	354
9-8 三相變壓器.....	358
9-9 自耦變壓器.....	361
9-10 空心變壓器，互感.....	365
問題.....	368

第十章 電機機械原理 374

10-1 電機機械能量變換.....	374
10-2 發生的電壓.....	376
10-3 電磁轉矩.....	381
10-4 直流電機中的整流子作用.....	388
10-5 直流電機.....	392
10-6 同步電機.....	396
10-7 感應電機.....	400
10-8 損失和效率.....	401
10-9 電機定額.....	404

問題.....	407
第十一章 直流電動機和發電機	412
11-1 直流電機的結構.....	412
11-2 電樞電動勢.....	415
11-3 反電動勢.....	416
11-4 電樞繞組和磁場繞組.....	419
11-5 等效電路.....	425
11-6 電樞反應.....	429
11-7 直流電動機的特性及用途.....	433
11-8 直流電動機的起動.....	444
11-9 直流發電機的特性及用途.....	450
問題.....	461
第十二章 三相感應電動機	466
12-1 結構.....	466
12-2 工作原理.....	470
12-3 旋轉磁場.....	471
12-4 同步速率和轉差率.....	475
12-5 轉子的頻率.....	477
12-6 交流轉矩.....	478
12-7 等效電路.....	482
12-8 近似的等效電路.....	496
12-9 最大功率輸出	501
12-10 感應電動機的性能.....	502
12-11 起動條件.....	510
12-12 速率控制.....	512

問題.....	516
第十三章 單相電動機	521
13-1 單相感應電動機.....	521
13-2 單相感應電動機的起動.....	527
13-3 分相電動機.....	531
13-4 電容電動機.....	532
13-5 串激電動機.....	532
13-6 交流串激電動機的反電動勢、功率和轉矩.....	535
13-7 推斥電動機.....	542
問題.....	548
第十四章 交流發電機和同步電動機	549
14-1 同步電動機結構.....	549
14-2 交流發電機的電動勢和輸出.....	552
14-3 交流發電機的調整和效率.....	561
14-4 同步電抗和同步阻抗.....	569
14-5 同步電動機的原理.....	571
14-6 同步電動機的向量圖.....	574
14-7 V形曲線.....	579
14-8 功率因數改正.....	583
14-9 同步電動機的起動.....	588
問題.....	590
索 引	595

電 工 學

第壹篇 電路理論

第一章 直流電路

在今日時代中，人類的生活，文明的進步，均有賴電能普遍應用，得以完善與昌大。我們日常所接觸的，電話能將聲音傳達遠方，電燈能光明照耀，電爐能燒煮食物，小至電晶體接收機，接收音樂，享樂受用，大者電子計算機，操作應用，解答不易解決的問題，莫不以電能變換，始臻功效。電機工程為研究各種型的能量，變換為電能，將其輸送並分配，以及最後有效加以利用它的控制或再行變換能量的學問。

再者，電機工程與其他工程均有密切關係，諸如電動機為各種工程不可缺少的原動力，電儀表為工程上測量必需的儀具。甚至人造衛星，太空探險，月球登陸，若無電機工程密切配合，必無今日卓異的成就。電機工程對二十世紀各方面技術的進步，其功宏偉。

電工學為一種研究電機工程有組織有系統的知識。事有先後，物有本末，電路理論為研讀電工學首先必須瞭解者，而本章直流電路又為電路理論的基本首要。

1-1 功、能和功率

2 電工學

電機工程的主要事務，是一種功 (work) 的處理，將適當形式的能 (energy)，分送至合適的地方，並對許多意向中的目標之一，供應足夠的功率 (power)。這一句話的一般涵義，可以使人了解，在通常說話中，對於功、能和功率諸字的想法。這些名詞對工程而言是很基本的，但必須考慮到它們與量的關係和更精確的意義。

當某物對抗一種阻力而移動時，它就在作功。例如，舉起一重物，抵抗其重力，或者改變一物體運動的狀況，克服其慣力，這類工作均為作功。在工程中，功的意義，亦本此意而加以數量的規定。一力與其沿移動所行路程的乘積，稱為此力所作的功。即

$$\text{功} = \text{力} \times \text{路程} \quad (1-1)$$

功的英制單位是呎磅，或為舉起一磅重物到達一呎高所作功的數量。當 150 磅體重的人升高 20 呎至三樓時，作功為 $150 \times 20 = 3,000$ 呎-磅。在國際度量衡制中功的單位為焦耳 (joule)。一焦耳約等於 0.738 呎-磅。

能為物體作功的本領。以另一方式來想像功，可視它為能的變換。能的單位顯然與功的單位相同。當舉起一物體時，人們或起重機必須消耗其能。但在另一方面物體因自身的位置變更而獲得位能，物體遂亦有作功的本領。例如將物體自地上移至桌上，則當物體復自桌上降落於地上時，作於物體上的功，因降落時的運動，而增加其動能。在這事例中，在降落開始的瞬時，物體的能量純為位能。及其下降，其位能遂漸變為動能，在抵達地上的來臨，物體運動速度最大，其能量純變為動能。在撞擊地面時，能量轉移至地，而轉變成熱能。

有關研究能中的基本觀念，即是能不會無中被產生，亦不得將之消滅於烏有。這能量不滅定律對於早期的科學家不能立刻明白，因為在許多機械工作的過程中，有些能為抵抗摩擦而用盡，變成為熱。其

實熱正是能的形式之一種，在數量上可以轉變為功。欲使 1 磅水升高溫度華氏 1 度需要 778 呎-磅功的當量。這熱的機械當量澄清了能量不滅定律。這一意義甚為重要，此後之聲、光、電及磁各現象，大都均為有關於各種能量的互變。

在實際應用中，人們都很關心做功或產生能的率，這率稱為功率。它為單位時間內所作的功。通常測量功率的單位是用馬力，每匹馬力相當於每秒 550 呎-磅的功。或用瓦特 (watt) 為單位測量，1 瓦特等於每秒 1 焦耳。因此，在時間 t 內，如完成的功，或產生或消滅的能為 W ，則其平均功率 P 為

$$P = \frac{W}{t} \quad (1-2)$$

倘使人們對於瞬時功率感有興趣，則可以寫成瞬時功率公式，即

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-3)$$

在此處小寫字 p 指示瞬時功率數量， $\frac{d}{dt}$ 為數學公式中常用的時率式。

因為功率和能之間的密切關係，人們常發現瓦-秒表示為能的單位。一瓦-秒是與一焦耳相同。瓦-秒的單位，在商用方面，仍嫌過小，通用較大的單位稱為仟瓦小時。一仟瓦小時等於 $1,000 \times 3,600 = 3.6 \times 10^6$ 瓦-秒或焦耳。

【例題】將電能輸入一蓄電池，在其中，轉變成為化學能，以 400 瓦特的恒率蓄電。此外，輸入至該蓄電池的功率之 20 % 變成熟而消耗。如商業用的電費價格每仟瓦小時為台幣 2.10 元時，求該蓄電池充電 10 小時需要電費若干？

解答：設 P_0 為輸入至蓄電池變化學能和熱的總功率，則

$$400 + 0.20 P_0 = P_0$$

4 電工學

或 $\sim P_0 = 500$ 瓦特

在 10 小時內的總能量為

$$W_0 = \frac{500}{1,000} \times 10 = 5 \text{ 仟瓦小時}$$

及 電費 = $5 \times 2 \cdot 10 = 10 \cdot 50$ 元

由於功率或能的 20 % 為損耗，該充電過程有 80 % 的效率。

1-2 電荷

最基本的電量是電荷 (charge)。人們都聽說過，原子由若干電子 (electron) 與一個原子核組成。電子像行星環繞着太陽一樣，循原子核而運行。原子核中含有質子和中子。電子的數目由原子序決定，質子的數目與電子相等，質子與中子數目的和稱為質量數，其數值約等於原子量。每個電子帶有負電荷，質子帶有正電荷，中子不帶電荷。在每個原子內，其電子的總負電荷，適等於諸質子的正電荷，此時，原子稱為不帶電或中和狀態。

電子環繞原子核而運行，由於核內正電荷對它的吸引，使電子循環一定軌道而旋轉。如能設法驅使電子脫離它的軌道，電子的作用就能呈現出電來。當物質內的電子被驅脫離它們的軌道，在驅走之處就缺少電子，電子驅走後到達某點，在此點就獲得過多電子。在物質中電子過多，就稱它為帶有負電荷；反之，當缺少電子時，則稱它帶有正電荷。此等電荷的存在，謂之靜電。

由於原子核內的正電荷不能活動，欲使物質產生正或負電荷，必須使電子移動。任何物質帶有正電荷時，其原子核內的正電荷仍是正常數量，惟係失去或缺少外層運行的電子。不過，帶有負電荷的物質才是正真有過量的電子。電荷通常用英文字母 Q 表示，用庫侖 (cou-

lomb)單位測量。一個電子所帶的負電荷是 1.602×10^{-19} 庫侖，那就是需要約 6.242×10^{18} 個電子形成等於一庫侖的電量。

電荷的最大效應是它能產生力。當兩電荷的符號相同時，它們有相互的排斥力；反之，如兩電荷的符號不同時，則它們有相互的吸引力。由於電子帶有負電荷，凡能吸引電子的電荷遂為正電荷；質子帶有的電荷為正，即是一例。注意，每一電荷所感覺的排斥力或吸引力是相等的。在兩帶電荷物體間互相作用的力，與此兩電荷的乘積成正比，而與其間距離的平方成反比。1785至1789年間庫侖 (Coulomb) 氏以帶電的球體作試驗，證明上述關係。設兩物體各帶 Q_1 和 Q_2 庫侖電荷，兩者之間距離為 d 公尺，用 MKS 制，則力 F 的大小為

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi \epsilon_0 d^2} \quad \text{牛頓 (Newtons)} \quad (1-4)$$

此處 ϵ_0 為電荷在真空處的介質係數 (permittivity)， 4π 為用 MKS 制中的比例常數。

公式 (1-4) 為著名的庫侖定律或平方反比定律。此公式與萬有引力的公式同一類型。以上闡釋的情形，亦能這樣說法：在一電荷鄰近地區，顯現一種受有應力的情況，對於任何置於其中的另一電荷，亦有力的作用。若所置電荷為充分的大量，應力可以極大。如所置電荷逐漸遠離，則應力漸次減弱。凡在應力情況所存在的區域，稱為場 (field)。由電荷的存在建立的場謂之電場 (electric field)。目前所論及的電荷為靜止的，所以它又可以稱為靜電場 (electrostatic field)。再注意與重力及萬有引力一般相似之處，例如當火箭脫離地球引力範圍時，作用在火箭上的重力已微小至可以忽略了。一個電荷在電場中就有這樣類似的情況。

依照平方反比定律，將場的概念來形容力的情形，在工程上是一