

本書遵照教育部專科學校課程標準編著

專科電工原理

編著者

劉雲樵

興業圖書股份有限公司印行

本書遵照教育部專科學校課程標準編著

專科電工原理

編著者

劉雲樵

興業圖書股份有限公司印行

版權所有・翻印必究

中華民國六十八年九月一日一版

專科電工原理

基本定價九元

編 著 者：劉 雲 樵
發 行 人：王 志 康
出版事業登記證局版臺業字第〇四一〇號
出 版 者：興業圖書股份有限公司
發 行 人：興業圖書股份有限公司
臺南市勝利路一一八號
電 話 三 七 三 二 五 三 號

學校團體採用購買另有優待
郵政劃撥南字第 31573 號

編 輯 大 意

本書係依據 67 年 7 月教育部公佈之工業專科學校電機工程科電工原理課程標準編撰，供二學期之用。

本書所用專有名詞，均依照教育部五十一年公佈之「電機工程名詞」及六十年公佈之「電子工程名詞」為標準，若無正式譯名者，則配合原文字義斟酌訂定，各專有名詞第一次出現時，均附有原文，以資參照。

本書共分十一章，內容包括電場、電路、導線材料、磁場、磁路、網路分析、電磁感應、變壓器、電感、電容、暫態及電能變換和超導體等，以簡單之物理觀念為基礎，理論與實際並重，由淺入深，對電學理論作有系統之介紹，以奠定電路、電機械、電子學之基礎。

本書各章之重要部份特以黑體字印刷，可加深學習效果。

本書之例題經過慎重選擇，力求淺顯易懂，並着重實用，特別注重觀念之建立，學者應多體會其運用及演算技巧。

各章之末列有習題，以增進對課文內容之了解，計算題之答案附於書末，以供學者自習印證之用。

本書雖經審慎編輯，細心校閱，但仍恐有疏漏，尚祈諸先進惠賜指正，是幸。

編者 謹識

目 錄

第一章 概 論

1—1 電學發展簡史.....	1
1—2 單位與因次.....	3
1—3 向量與無向量.....	10
習題一.....	11

第二章 靜電及電流

2—1 電之性質.....	12
2—2 原子的構造.....	13
2—3 庫侖定律.....	18
2—4 靜電場.....	21
2—5 電位能及電位.....	26
2—6 電 流.....	32
習題二.....	36

第三章 電 阻

3—1 電阻及電阻係數.....	38
3—2 電導及電導係數.....	43
3—3 實用電阻器.....	44
3—4 電阻之溫度係數.....	49
3—5 導線材料及線規.....	54
習題三.....	57

第四章 歐姆定律、功率及能量

4—1 電路組成要件.....	59
4—2 電動勢及端電壓.....	60
4—3 歐姆定律.....	61
4—4 電能及電功率.....	63

4—5	焦耳定律	65
4—6	電解	67
4—7	法拉第電解定律	69
4—8	損失及效率	72
	習題四	73
第五章 串聯及並聯電路		
5—1	串聯電路	76
5—2	克希荷夫電壓定律	78
5—3	分壓器法則	80
5—4	並聯電路	82
5—5	克希荷夫電流定律	86
5—6	分流器法則	88
5—7	串並聯電路	93
5—8	Y— Δ 變換	96
5—9	電池的內阻、串聯及並聯	100
	習題五	108
第六章 網路分析		
6—1	名詞簡介	114
6—2	電壓源與電流源	115
6—3	行列式之運算	130
6—4	支路電流法	135
6—5	網目電流法	136
6—6	節點電壓法	139
6—7	重疊定理	143
6—8	戴維寧定理	148
6—9	諾頓定理	154
6—10	倒置定理	158
6—11	代換定理	160

6-12	惠斯登電橋	162
6-13	補償定理	164
6-14	有源 Δ -Y變換	170
6-15	密爾門定理	174
6-16	最大功率轉移定理	177
6-17	直流三線系統	179
	習題六	183

第七章 磁場及磁路

7-1	磁鐵及磁場	193
7-2	磁場之求法	198
7-3	磁分子學說	201
7-4	磁場感應	202
7-5	庫倫磁力定律	204
7-6	通電導體周圍之磁場	206
7-7	磁通密度	210
7-8	磁場強度	211
7-9	導磁係數	212
7-10	磁化曲線	214
7-11	磁滯及磁滯迴線	215
7-12	磁場中之能量	217
7-13	磁場對運動電荷之作用力	219
7-14	迴轉加速器	224
7-15	磁動勢與磁位降	228
7-16	安培定律	229
7-17	磁路歐姆定律	230
7-18	磁路之計算	233
7-19	磁路與電路之對偶性	242
	習題七	245

第八章 電磁感應

8-1	變化磁場感生電勢	247
8-2	法拉第感應定律	249
8-3	感應電勢之方向判定	251
8-4	導線與磁場相對運動產生電勢 (發電機原理)	253
8-5	磁場對通電流導體之作用力 (電動機原理)	259
8-6	帶電流平行導體之作用力	266
8-7	自感與自感電勢	267
8-8	互感應	271
8-9	漏磁	274
8-10	變壓器之功用、構造及原理	277
8-11	渦流及渦流損失	285
8-12	電磁鐵之吸引力	287
	習題八	288

第九章 電感

9-1	電壓之性質	291
9-2	電感之串聯和並聯	292
9-3	電阻電感電路	303
9-4	電感器儲存之能量	316
	習題九	319

第十章 電容

10-1	介電質和電容	323
10-2	電容之性質	330
10-3	電容器之種類	332
10-4	電容器之串聯和並聯	336
10-5	電阻電容電路	332

10—6	電容器儲存之能量	348
10—7	電阻—電感—電容電路	349
	習題十	355
第十一章	電能變換	387
11—1	能量變換方式	
11—2	熱電能量的變換	360
11—3	光電效應與光電池	360
11—4	化學電池	367
11—5	超導電和超導磁	376
	習題十一	390
	附錄A：標準裸銅單線 (AWG)	392
	附錄B：硬銅單電線 (CNS)	394
	附錄C：硬銅絞電線 (CNS)	395
	附錄D：單位換算	396
	附錄E：三角重要公式及關係	398
	附錄F：本書常用微積分公式	400
	習題解答	401

第一章 概 論

1-1 電學發展簡史

在今日的世界，電已成個人與社會生活中不可或缺之物，舉凡能想到之一切事物，幾乎無不直接或間接和電能有關係，例如汽車之行駛，有賴電能之點火、起動及照明，家庭之冰箱、洗衣機和冷氣機、百貨公司之電梯、工廠之電動機或鐵路之電氣化等均必須以電能為動力，電鍍及電鍊必須經電能之作用，始能達成電化效應之目的，無線電、電視之廣播和接收、電話通信及傳真、無人飛機之遙控、輪船及飛機之導航，以及馬路之燈光號誌等均不可一時無電，電之所以如此有用而重要，主要在電能可用極便捷之方式和極高度之效率，轉變為光能、熱能、機械能、聲能、化學能或磁場能量等，而電能之獲得及運送亦遠較其他能量經濟及快速。

電能之應用雖是如此之廣，而電之發現也雖遠在西元前600年*，然而其顯著發展則為近百年來之事，在公元1780年，賈瓦尼（Luigi Galvani, 1737-1798）發現從青蛙割下之蛙腿，當觸及二接觸一起之二不同金屬之兩端時有抖動現象，進一步研究後證實有電流存在，根據這項發現，伏特（Alessandro Volta, 1745-

* 在西元前600年，希臘人已發現琥珀以羊毛摩擦後能吸引輕微物體而知有電之存在，今日英文字之“電子”為electron，即為當時希臘文琥珀（elektron）一字衍化而成。

1827) 在 1779 年發明了伏打電池，首創電之流動現象，在 1785 年，庫倫 (Charles Augustin de Coulomb, 1736-1806) 對靜電及磁極作試驗，證實磁極及電荷之平方反比定律 (inverse-square law)；在 1820 年，安培 (Andre' Marie Ampere, 1775-1836) 發現通有電流之導線周圍必產生磁場之效應，根據此效應，奧斯特 (Hans Christian Oersted) 在 1826 年發現了磁場與帶電流導體之作用關係；1827 年，歐姆 (Georg Simon Ohm, 1787-1854) 宣佈歐姆定律，1831 年，法拉第 (Michael Faraday, 1791-1867) 發現了電磁感應現象而造出第一個變壓器，並在 1833 年發明了電解定律，對電化學帶來曙光；在 1831 年，亨利 (Joseph Henry, 1797-1878) 發現自感電勢並發明了第一個電鈴；在 1834 年，楞次 (Henri Frederic Emile Lenz, 1804-1885) 發現了感應電勢與磁場變化之關係；在 1837 年，莫爾斯 (Samuel Finley Breese Morse, 1791-1872) 展示其第一具電報裝置；在 1841 年，焦耳 (James Prescott Joule, 1802-1851) 利用量熱器確定電熱之精密測定；在 1859 年，蒲蘭第 (Gaston Plante', 1834-1889) 設計出第一個蓄電池，在 1876 年，貝爾 (Alexander Graham Bell, 1847-1922) 發明了電話；在 1874 年，愛迪生 (Thomas Alva Edison) 發展出多工電報系統，隨後在 1879 年，發展出第一個白熾燈，1882 年創辦了第一個電力廠，至此人類開始享用電之功能；在 1887 年，赫芝 (Heinrich Rudolph Hertz, 1857-1916) 發現了光電放射效應，此為電眼 (electric eye) 之基本原理；同年，湯姆遜 (Elihu Thomson, 1853-1937) 建立了第一個排斥感應電動機；在 1895 年，羅音特 (Wilhelm Konrad Roentgen) 發現了 X 光；1901 年，馬克尼 (Guglielmo Marconi, 1871-1937) 完成了無線電通訊，在 1906 年，富雷斯 (Lee de Forest) 發明了三極管，更助長了電子通訊之發展，

對此後之無線電廣播，載波電話系統之建立，以及微波雷達研究製造發展皆大有裨益，自第二次大戰開始以後，各國爲了本身安全，在電子工業之發展及競爭更趨於白熱化，其中最重要之成就爲：(一)1948年巴定(Bardeen)與勃拉登(Brattain)在貝爾電話實驗室發明了電晶體，同年蕭克萊(Shockley)宣佈了電晶體之用途及優越性。(二)1951年列明頓(Remington)推出第一部電子計算機UNIVAC。(三)1958年美國陸軍通訊部隊研製成功積體電路(integrated circuits)，日新月異之成果，有助人類太空通訊及窺探宇宙奧密，今日，由於電子裝置之推陳出新，迅速發展，使各行各業均邁進了電子時代，電乃成爲社會進化、科學發展、以及生活安樂之原動力。

1-2 單位與因次

凡表示事物之多寡或大小，均稱之爲量(quantity)，量之組成，包括大小(magnitude)及單位(unit)，數值之大小與選用單位有關，通常由每單位量(per-unit)所決定，單位量爲衆所公認之定量，可用來表示事物相同性質之含量大小，單位量雖可任意選定，但必須有明確定義，並應顧及應用之方便，定義明確，始能保持單位之性質不變，不致產生混亂；應用方便，方可普及爲衆所公認及樂用，而成爲相同性質之大小比較標準。

工程上常用之單位可概分爲兩類，即基本單位(fundamental unit)及導出單位(derived unit)，基本單位又可分爲主基本單位(primary fundamental unit)及輔助基本單位(auxiliary fundamental unit)，主基本單位爲物理學中力學之主要單位，係指長度、質量及時間三者之單位，爲其他學科所共同應用，可分爲三種系統，即(1)M.K.S制，分別爲公尺、公斤及秒；(2)C.G.S制，分別爲公分、公克及秒；(3)F.P.S制，分別爲呎、

磅及秒；輔助基本單位為熱學、光學或電學所專用者，例如愷氏溫度（°K），燭光（candle）及安培（ampere）等。導出單位係由基本單位組合或換算而成之單位，故又稱組合單位，例如平方公尺、平方公分為面積之單位；立方公尺、立方公分為體積之單位；公尺／秒，公分／秒為速度之單位；公斤／立方公尺、磅／立方呎為密度之單位等。

導出單位可用因次（dimension）予以識別，例如長度用L，時間用T，質量用M，則面積之單位因次為 L^2 ，體積之單位因次為 L^3 ，速度之單位因次為 LT^{-1} ，密度之單位因次為 ML^{-3} 。

電工單位可分為四種單位系統，即(1) **C.G.S 靜電單位系統**（C.G.S electrostatic unit system），(2) **C.G.S 電磁單位系統**（C.G.S electromagnetic unit system），(3) **實用單位系統**（practical unit system），及(4) **國際單位系統**（international system of units），茲分述如下：

(1) **C.G.S 靜電單位系統**：以靜電學之庫倫定律（Colomb's law）為依據，此定律謂：兩帶電體間之相互作用電力大小與二者帶電量之乘積成正比，與距離之平方成反比，即

$$F = K \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (1-1)$$

式中，F：為兩電荷間之作用力，單位為達因（dyne = 1g-cm/sec^2 ）

Q_1 及 Q_2 ：兩帶電體之帶電量，單位為靜庫（stat-coulomb）

r：兩帶電體間之距離，單位為公分。

K：比例常數，在真空中，K之值定為1，其倒數稱為介質係數（permittivity），常以 ϵ 表示之，在真空中，

$$\epsilon = \epsilon_0 = 1.$$

設在真空中，令兩電荷量相等，即 $Q_1 = Q_2 = Q$ ，則

$$Q = \sqrt{F r} \quad (1-2)$$

由上式可得一靜庫之定義為二等量電荷相距 1 公分，而作用力恰為 1 達因時之電量。

至於其他電量單位可依次導出，如電流之定義為某固定截面在單位時間所通過之電量，即

$$I \equiv \frac{Q}{t} \quad (1-3)$$

式(1-3)中，若 $Q = 1$ 靜庫， $t = 1$ 秒，則 I 之單位為靜安 (stat-ampere)，即 1 靜安 = 1 靜庫/秒。

再根據有關電量之定義可導出其他電量之單位來，由這些單位所形成之系統，即稱為 C.G.S 靜電單位系統，此系統在各單位前均冠以“靜 (stat-)”字樣以資識別。

(2) C.G.S 電磁單位系統：以磁學之庫侖定律為依據，此定律謂：兩磁極間之磁作用力與二磁極強度乘積成正比，與距離之平方成反比，即

$$F = K' \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1-4)$$

式中， F ：為兩磁極間之作用力，單位為達因。

m_1 及 m_2 ：兩磁極強度。

r ：兩磁極間之距離，單位為公分。

K' ：比例常數，在真空中， K' 之值定為 1，其倒數稱為導磁係數 (permeability)，常以 μ 表示之，即在真空中， $\mu = \mu_0 = 1$ 。

設在真空中，由(1-4)式，令 $m_1 = m_2 = m$ ，則

$$m = \sqrt{F r} \quad (1-5)$$

上式中，若取 $F = 1$ 達因， $r = 1$ 公分，則此二相等磁極之磁極強度稱為 1 單位磁極 (unit pole)。

依據磁極及有關磁量之定義，可導出其他磁量單位來，由這些單

位所形成之系統，即稱為C.G.S電磁單位系統，此系統在各單位前常冠以“ab”字樣，諸如電磁伏特（abvolt）或電磁安培（abampere）等。

(3) 實用單位系統：前述之C.G.S靜電單位和電磁單位作實際應用時，可發現所用數值，非為過大，即為過小，殊為不便，例如普通家庭用電之100伏特電壓，若以電磁單位表示，則為 10^{10} 電磁伏特，以靜電單位表示，則為 $1/3$ 靜伏，又如1安培的電流，以電磁單位表示，為0.1電磁安培，以靜電單位表示，則為 3×10^9 靜安，在數值上之處理極為不便，為了實際應用，乃以C.G.S電磁單位為基礎，發展出實用單位系統，諸如電流之單位為安培（ampere, A）、電壓之單位為伏特（Volt, V），電阻之單位為歐姆（Ohm, Ω ）等，其有關定義，將散見於以後各有關章節中，因主單位採M.K.S系統，而輔助單位之電流以安培（A）為單位，故又稱為**M.K.S.A.系統**。

表1-1為實用單位之六個基本量之單位及符號，表1-2為目前使用實用電工單位之名稱、符號及有關因次，注意表中第二行中之電量符號與第四行中之單位符號不可相混。

表1-1 M.K.S.A.單位系統之基本量

量	符 號	單 位	單位符號	因次
長 度	l	公尺	m	L
質 量	m	公斤	kg	M
時 間	t	秒	S	T
電 流	I	安培	A	I
溫 度	T	愷氏溫度	$^{\circ}\text{K}$	θ
光 度		燭光	Cd	

表 1—2 M.K.S.A. 電工單位系統

電 量	符 號	單 位	單 位 符 號	因 次
電 流	I	安培	A	I
電 荷	Q	庫倫	C (A S)	T I
電 壓	V 或 E	伏特	V (W / A)	$L^2 M T^{-3} I^{-1}$
電 阻	R	歐姆	Ω (V / A)	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$
電 功 率	P	瓦特	W	$L^2 M T^{-3}$
電場強度	$\mathcal{E}$	伏特/公尺	V/m	$L M T^{-3} I^{-1}$
電通密度	D	庫倫/公尺 ²	C/m ²	$L^{-2} T I$
電 能	W	焦耳	J	$L^2 M T^{-2}$
電 容	C	法拉	F (A S / V)	$L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$
電 感	L 或 M	亨利	H	$L^2 M T^{-2} I^{-2}$
磁場強度	H	安培/公尺	A/m	$L^{-1} I$
磁通密度	ϕ	韋伯	Wb	$L^2 M T^{-2} I^{-1}$
磁 通 勢	U	安培	A	I
磁通密度	B	忒斯拉 (tesla)	T (Wb / m ²)	$M T^{-2} I^{-1}$
頻 率	f	赫芝	H z	T^{-1}

(4) 國際單位系統：電工發展初期，各國量度技術未臻完善，其所使用單位，差異甚大，未能統一，使用上諸多不便，及至公元 1908 年在英國倫敦召開國際電工技術委員會時 (I E C)，商定各單位之標準規格，製定電氣原標準器 (primary standard)，稱為國際電工單位 (international electrical unit)，主要者有下列四個單位：

(A) 國際歐姆 (international ohm)：在 0°C 時，質量為 14.4521 克，長度為 106.300 公分，截面積均勻之水銀柱，對於

不變電流通過所生之電阻，稱為1國際歐姆。

(B) 國際安培(international ampere)：在濃度15%之硝酸銀(AgNO_3)溶液中，放入白金片與白銀片作為正與負電極，能使白銀片每秒鐘析出0.001118克純銀之穩定電流，稱為1國際安培。

(C) 國際伏特(international volt)：電阻為1國際歐姆之導體，欲通過一國際安培所需之電壓，稱為1國際伏特。

(D) 國際瓦特(international watt)：在1國際伏特電壓下，電路中通過一國際安培時，電路上每秒所消耗之電功率，稱為1國際瓦特。

上述國際單位與C. G. S 電磁單位所導出之實用單位，在數值上並不一致，其關係如下：

$$1 \text{ 國際歐姆} = 1.000495 \text{ 絕對歐姆}$$

$$1 \text{ 國際安培} = 0.999835 \text{ 絕對安培}$$

$$1 \text{ 國際伏特} = 1.000330 \text{ 絕對伏特}$$

$$1 \text{ 國際瓦特} = 1.000165 \text{ 絕對瓦特}$$

$$1 \text{ 國際庫侖} = 0.999835 \text{ 絕對庫侖}$$

$$1 \text{ 國際亨利} = 1.000495 \text{ 絕對亨利}$$

$$1 \text{ 國際法拉} = 0.999505 \text{ 絕對法拉}$$

$$1 \text{ 國際焦耳} = 1.000165 \text{ 絕對焦耳}$$

至於實用單位、靜電單位及電磁單位之關係如表1—3所示。

表 1—3 實用單位、靜電單位及電磁單位之關係

電量	實用單位名稱	靜 電 制 單 位	電 磁 制 單 位
電 流	安培 (A)	3×10^9 靜安 (stat-A)	10^{-1} 電磁安培 (ab-A)
電 壓	伏特 (V)	$\frac{1}{3} \times 10^{-2}$ 靜伏 (stat-V)	10^8 電磁伏特 (ab-V)