

電 工 原 理

黃 台 律 編 著

科技圖書股份有限公司

電 工 原 理

黃 台 律 編著

科技圖書股份有限公司

0681

本公司經新聞局核准登記
登記證局版台業字第1123號

書名：電工原理

編著者：黃台律

發行人：趙國華

發行者：科技圖書股份有限公司

台北市博愛路185號

電話：31109

郵政劃撥帳號：15697

六十七年九月初版 特價新台幣70元

編輯大意

- 一、本書依照民國六十五年六月教育部頒布五年制工業專科學校電機工程科課程標準編輯而成。全書共分十一章編寫全一冊專供五年制工專電機工程科第二學年上下學期每週3小時電工原理課程教學之用。
- 二、本書有關涉及高深數學時，均設法利用一般數學作基本解釋。書中數學式子盡量減少，而以物理觀念說明之。
- 三、本書每章後均附有適量的問題，讓讀者研讀一章之後，演算些習題有助讀者透徹了解與靈活運用。
- 四、本書中插圖衆多，例題不少，幫助讀者了解文中之意，收效很大。
- 五、本書編者或有疏忽之處，尚祈施教師長及讀者不吝指正，則竭誠感荷。

自序

本書是完全根據教育部六十五年六月所訂專科學校電工原理課程標準而編寫，適用於電機工程科第二學年上、下學期。全書共計十一章，由電學與磁學的發展簡史開始談起，到電能變換止。書中內容主要着重基本電學與磁學原理及直流電路之介紹，編者盡量以一些簡易的物理觀念取代複雜的數學分析，使學生很容易在研讀之後建立整個具體的概念。

第一章中的概論能讓讀者了解電學、磁學及彼此間關係整個過程，並了解一些偉大科學家的研究心得與成就貢獻，使讀者對以後各章中的電磁定律或其它定理的由來有一概略的認識。

第二章主要敘述靜電的一些基本觀念，書中對於電場、電位及電能有詳細的說明。

第三章對於電阻的特性，如電阻係數和電導係數、電阻隨溫度變化的情形，實用電阻器均一一地加以介紹。並對導線材料和線規也有詳述。

第四章是電學上很重要的一章，歐姆定律說明了電壓、電流及電阻之間的關係，焦耳定律使讀者明瞭電能變為熱能。

第五、六兩章討論電路與網路分析，是所有研習電機科或電子科學生必備之知識。各種解電路的方法有賴讀者勤加學習，對於日後的電路學有很大的幫助。

第七章探討磁場與磁路，本章中對磁場強度、磁通、磁通密度、

磁阻及磁滯有詳細的介紹。有關磁學的一些重要公式在本章也加以討論。

第八章的電磁感應主要研究如何將磁變為電？發電機及電動機原理有助讀者研習電機機械。

第九、十兩章分別介紹電感與電容之基本觀念，它們的各種聯接方式及磁場、電場儲存之能量計算。也介紹些簡單的暫態現象，對讀者日後學習電子及控制系統有很大的助益。

第十一章為電能變換，其中包括熱電能量變換、光電能量變換、電化能量變換。超導電和超導磁是很新的觀念，在此也簡介紹讀者。

本書完全依照教育部所訂定而編寫，使五專學生能按步就班循此書而了解電工原理的概念。涉及高深數學時（如微積分、微分方程等）均設法用一般數學作基本解釋，不致於使讀者因高深數學未學習過，而對電工原理裹足不前。

編 者 謹識

電 工 原 理

目 錄

第一章 概 論

§ 1-1	電學與磁學發展簡史·····	1
§ 1-2	單位與因次·····	4
§ 1-3	向量與純量·····	7

第二章 靜電及電流

§ 2-1	電的性質·····	12
§ 2-2	原子的構造·····	13
§ 2-3	庫侖定律·····	15
§ 2-4	靜電場·····	17
§ 2-5	電位能與電位·····	26
§ 2-6	電流·····	32

第三章 電 阻

§ 3-1	電阻係數和電導係數·····	36
§ 3-2	電阻和實用電阻器·····	37
§ 3-3	電阻的溫度係數·····	42
§ 3-4	導線材料和線規·····	45

第四章 歐姆定律，功率及能量

§ 4-1	歐姆定律·····	48
§ 4-2	功率·····	50

2 電工原理

§ 4-3 焦耳定律和電解	52
§ 4-4 效率	56

第五章 串聯和並聯電路

§ 5-1 串聯電路	59
§ 5-2 克希荷夫電壓定律	60
§ 5-3 分壓器法則	63
§ 5-4 並聯電路	65
§ 5-5 克希荷夫電流定律	66
§ 5-6 分流器法則	70
§ 5-7 串並聯電路	73
§ 5-8 Y- Δ 變換	77
§ 5-9 電池的內阻，串聯和並聯	80

第六章 網路分析

§ 6-1 電流源和電壓源	86
§ 6-2 支路方法	88
§ 6-3 行列式的運算	92
§ 6-4 網目電流法	96
§ 6-5 節點電壓法	99
§ 6-6 重疊原理	102
§ 6-7 戴維寧定理	105
§ 6-8 諾頓定理	109
§ 6-9 倒置定理	112
§ 6-10 最大功率轉移定理	116

第七章 磁場和磁路

§ 7-1 磁鐵	122
§ 7-2 磁場的性質	124
§ 7-3 通電導體周圍的磁場	125

§ 7-4	磁場對運動電荷的作用力	132
§ 7-5	磁場強度和磁通密度	135
§ 7-6	迴轉加速器	140
§ 7-7	磁路的歐姆定律	142
§ 7-8	磁化曲線和磁滯	145
§ 7-9	磁路的計算	149
§ 7-10	磁路與電路的對偶性	153

第八章 電磁感應

§ 8-1	法拉第電磁感應定律	157
§ 8-2	冷次定律	159
§ 8-3	磁場對通電導體的作用力（電動機原理）	160
§ 8-4	導線與磁場相對運動產生電動勢（發電機原理）	163
§ 8-5	自感和互感	166
§ 8-6	變壓器原理	173
§ 8-7	渦流	175

第九章 電 感

§ 9-1	電感的串聯排列	179
§ 9-2	電感的並聯排列	180
§ 9-3	電阻 — 電感電路	187
§ 9-4	電感器儲存的能量	191

第十章 電 容

§ 10-1	介電質和電容	197
§ 10-2	電容的性質	198
§ 10-3	電容的串聯和並聯	201
§ 10-4	電阻 — 電容電路	205
§ 10-5	電容器儲存的能量	209
§ 10-6	電阻 — 電感 — 電容電路	212

第十一章 電能變換

§ 11-1	能量變換方式·····	214
§ 11-2	熱電能量的變換·····	220
§ 11-3	光電效應與光電池·····	222
§ 11-4	化學電池·····	225
§ 11-5	超導電和超導磁·····	230

參考資料

第一章 概 論

§ 1-1 電學與磁學發展簡史

英文的“電”字(Electricity)是由古希臘時代琥珀的名字(Elektron)演變來的。琥珀是松樹樹汁的化石，以它命名人類這偉大的僕人，看來真是一件怪異的一點但就人類二千多年來對電的研究來說，這還不是最怪異的一點。在基督降生前約600年，電可以說已被發現了，但是差不多過了二千五百年，人們才開始實際使用電。現在物質文明發達：一按開關，電燈大放光明；一轉鈕，可聽到收音機發出的音響；電話可將聲音傳至遙遠的地方；雷達可以引導飛機、船隻航行；電視可將數百哩乃至千哩外的影像活生生地呈現眼前；電腦可以解決人類計算的困擾，其它如電冰箱、電梯、電車、電熱器等，無一不是電能的功勞。今日電已經和人類生活有密切的關係，學電已不再是某些人的專利品，人人都應具備電的基本知識。在研讀電工基本知識之前，對電學及磁學的發展簡史應有概略的了解。

西元前600年希臘賢人泰利斯(Thales)摩擦琥珀而能吸引輕微之物體，在進一步的試驗後，他斷定這吸引力是琥珀本身擁有的性質。大約在西元1600年，維多利亞女王時代，英人吉爾伯(Gilbert)報告說：除了琥珀之外，其他許多東西，包括玻璃、硫磺、雲母和鑽石，都具有這種神奇「電」的性質。

在1752年，美國富蘭克林(Franklin)在雷雨天放風箏以了解

2 電工原理

電的性質，他提出一個想法，就是電能夠以兩種狀態存在，他稱這兩種狀態為正及負。他又說電能在導體中流動，就像水在管子中流動一樣，這正是我們對於電的現代基本觀念。1785 年，法國陸軍工程師庫倫（Charles de Coulomb）利用所發明的扭秤（torsion balance）發現兩帶電體間之作用力與兩帶電體所帶電量的乘積成正比，而與其間距離的平方成反比，這就是有名的庫倫定律。1800 年，義大利帕維亞（Pavia）大學物理教授伏特（Volta）發明了「伏打電池」（Voltaic battery），包括一堆鋅圓板和銅圓板，圓板之間是石灰水浸過的皮革片或布片。這伏打電池產生足夠的電壓，推動電流通電電線。為了紀念這個發現，就將電壓的單位定為「伏特」。其後在 1820 年，法人安培（Ampere）利用伏打電池，發現電的流動與磁之間一個非常有趣的關係。事實上，在安培作出發現的數目前，丹麥科學家奧斯特（Oersted）曾報告說，如果把指南針放近電流通過的電線，它的動作異乎尋常。

安培深入的研究，發現電流會在周圍產生磁。為了證明此點，他使電流通過一線圈，而顯示出這線圈的作用完完全全地像一塊磁。這帶電的線圈能吸引鐵片，當它被懸掛起來，與指南針一模一樣地會指示南北方向。由於安培的發現，電流的單位乃以「安培」命名。再幾年後，德國科學家歐姆（Ohm）指出電線對電流有阻力，而這阻力根據電線的粗細和長短，以及做成電線的物質而變化。因為他的偉大貢獻，電阻的單位乃以「歐姆」命名。

1830 年，英國偉大科學家法拉第（Faraday）開始向他自己提出這個問題：如果電能夠產生磁，那麼磁能不能產生電呢？換句話說，這是一個可逆的反應嗎？與此同時，美國的亨利（Henry）也在思索這個問題。現在有兩個人，徘徊在一個發現的邊緣，而這個發現將改變文明的途徑。因為當法拉第和亨利在美國真正地用磁的方法產生電，而導致我們今天奇蹟般的電氣時代。

電真正為人類利用乃近百年之事。摩爾斯（Morse）和貝耳（Bell）駕馭了電，使它藉電線從電報和電話傳遞信息。1882 年愛迪生（Edison）在紐約建造了第一個實用的發電廠後，人類才開始享

受電的福祉。泰斯萊 (Tesla) 建議使用一種新形的電力——交流電——而且他設計出機器設備，去生產、分配和使用它。威斯丁霍斯 (Westinghouse) 支持泰斯萊，建造了所需的電力設備，去製造和使用交流電。十八世紀中葉，克希荷夫 (Kirchhoff) 首創目前所稱的克希荷夫定律，奠定電路理論之基礎。

1873 年馬克士威 (Maxwell) 將電磁學的定律寫成爲今日我們所知的形式，這些定律常稱爲馬克士威方程式 (Maxwell's equation)。馬氏能由理論證明電磁波的存在，並預言電磁能量可以藉電磁波以光的速度傳遞。在馬氏創立其理論之後二十餘年，赫茲 (Hertz) 在實驗室中產生電磁的“馬氏波”，即今日所稱之無線電短波，使電磁學更向前一大步。今日頻率以赫 (Hz) 爲單位，就是取 Hertz 名字的首尾二字而言，用以紀念赫茲非凡的貢獻。

1897 年馬可尼 (Marconi) 發明無線電信，而於 1901 年完成隔洋無線電通訊，舉世震驚。佛來銘 (Fleming) 於 1904 年製成二極管 (diode)，1906 年德佛來斯特 (de Forest) 進一步的研究改良二極管而完成了三極管，隨後四極管、五極管及多極管紛紛問世，使無線電通訊一日千里。在第二次世界大戰中，英國科學家華生、瓦特 (Robert Watson-Watt) 領導一些優秀的工程師從事微波 (microwave) 及雷達 (Radar) 的研究，終至成功，使得英軍藉着雷達能偵測德機之動向，而予以攔截，方能轉敗爲勝免於亡國之難。

大戰後各國對電子工程的研究無不全力以赴，其中最具突破性的成就當屬 1948 年美國貝耳公司的巴汀 (Bardeen)，布拉登 (Brattain) 與蕭克利 (Shockley) 所發明的電晶體 (transistor)，電晶體的功用雖與真空管相似，但因有很多真空管所不能及的優點，所以已有取代真空管的趨勢。如今由於半導體的突飛猛進，得以製成積體電路 (integrated circuit, 簡稱 IC)，使得電子產品的體積愈來愈小，重量也愈來愈輕，例如手掌大的計算器 (calculator)，電子錶、登陸月球的各種儀器以及最近風迷的微處理機 (microprocessor)，無不借助於 IC 之功勞。

近年來人類不斷地從事登陸各星球的行動，以便進一步窺探宇宙奧秘，這一連串的成就，無一不與“電”有密切之關連。而電工原理是了解“電”的基本知識，對於一位現代的國民而言，這是一門不可或缺之學問。

§1-2 單位和因次

只要是一種物理量均可予以量度，例如長度可用公尺（m）、公分（cm）、呎（ft）等表示；質量可用公斤（kg）、公克（g）、磅（lb）等表示；時間可用秒（sec）、分（min）、時（hr）等表示；電量可用庫侖（coulomb）、基本電荷（elementary charge）表示。這些用以表示一物理量所定的標準稱為單位（unit）。

物理學中有三個基本量，即長度、質量、時間。目前常用於科學上及工程上的單位，根據其所選基本量的大小，而有三種單位；其一為公尺 - 公斤 - 秒制，簡稱MKS制，在這種單位中，長度的單位為公尺，質量的單位為公斤，時間的單位為秒；一為公分 - 公克 - 秒制，簡稱CGS制，在這種單位中，長度的單位為公分，質量的單位為公克，時間的單位為秒；以上二種單位表示稱為公制或米制。另一為呎 - 磅 - 秒制，簡稱FPS制，在此種單位中，長度的單位為呎，質量的單位為磅，時間的單位為秒，此種單位表示稱為英制。

三個基本量的說法並不完整，應另加一基本單位，即重量，以這四種為基本單位，則任何其他物理量均可由此推導出來。這些由基本量所推導出之量稱為導出量，例如面積可用公尺²，公分²，呎²等表示，速度可用公尺/秒，公分/秒，呎/秒表示，力可用公斤 - 公尺/秒²，公克 - 公分/秒²，磅 - 呎/秒²表示，電流用庫侖/秒表示，此即安培，安培不是基本量，因它是由庫侖與秒所推導出來的，是為導出量。

任何物理量都可用四種基本量予以表示，這就是該物理量的因次（dimension），我們分別以〔L〕，〔M〕，〔T〕及〔Q〕表示長度、質量、時間及電量，則面積A的因次為

$$A = [L]^2 \quad (1-1)$$

速度 v ($v = \frac{s}{t}$) 之因次爲

$$v = \frac{[L]}{[T]} \quad (1-2)$$

加速度 a ($a = \frac{v}{t}$) 之因次爲

$$a = \frac{[L]}{[T]^2} \quad (1-3)$$

功 F ($F = ma$) 之因次爲

$$F = [M] \frac{[L]}{[T]^2} \quad (1-4)$$

電場強度 E ($E = \frac{F}{Q}$) 之因次爲

$$E = \frac{[M][L]}{[T]^2[Q]} \quad (1-5)$$

電壓 V ($V = E \times d$, d 爲距離) 之因次爲

$$V = \frac{[M][L]}{[T]^2[Q]} \times [L] = \frac{[M][L]^2}{[T]^2[Q]} \quad (1-6)$$

例 1-1 試求(a) RC (R 爲電阻, C 爲電容) (b) $\frac{L}{R}$ (R 爲電阻, L 爲電感) 之因次。

解: (a) $\because R = \frac{V}{I}, C = \frac{Q}{V}$ (這些公式將於後幾章提列)

$$\therefore RC = \frac{V}{I} \cdot \frac{Q}{V} = \frac{Q}{I} \quad \text{以因次表示} \quad \frac{[Q]}{[Q]} = [T]$$

故 RC 之因次為時間。

$$(b) \because L = \frac{E}{\frac{\Delta I}{\Delta t}} \quad (\epsilon \text{ 為電動勢}, \frac{\Delta I}{\Delta t} \text{ 為電流變化率})$$

$$\frac{L}{R} = \frac{\epsilon}{R \frac{\Delta I}{\Delta t}} \quad \text{以因次表示}$$

$$\frac{\frac{[M][L]^2/[T]^2[Q]}{[M][L]^2[T]} \times \frac{[Q]/[T]}{[T]}}{[T]^2[Q][Q]} = [T]$$

故 $\frac{L}{R}$ 之因次與 RC 一樣均為時間。

(注： RC 與 $\frac{L}{R}$ 在往後的 RC 與 RL 電路具有重要的地位)

因次的用途，主要是檢驗一等式是否正確：一等式之左右兩邊之因次必須一致。若發現各項之因次不一，則此等式必然有誤，因而可找出錯誤之所在。今舉一例如下：

例 1-2 某學生在作“一物體在平面的等加速 a 運動，該物體的初速度為 v_0 ，試問經過時間 t 之位移如何？”的問題，他所利用的公式為 $S = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ ，試應用因次的方法檢驗此式是否正確？

解：左邊的 S 表示位移，其因次為 $[L]$

右邊的第一項 $v_0 t$ ，其因次分析如下：

$$v_0 t = \frac{[L]}{[T]} \cdot [T] = [L]$$

右邊的第二項 $\frac{1}{2} at^3$ ，其因次如下：

$$\frac{1}{2} at^3 = \frac{[L]}{[T]^2} \cdot [T]^3 = [L][T]$$

$\frac{1}{2} at^3$ 的因次顯然與 S 或 $v_0 t$ 不合，所以我們可以斷然地下決論，此學生所列的公式有毛病的。

§ 1-3 向量與純量

在物理學及幾何學中，有些量不能單用一個數字表示之，而必須同時有方向及大小始能完全表明其特性，此種量稱為向量（vector），例如力、速度、或加速度等物理量均為向量。然而有些量僅具大小，不具有方向性之量則稱為純量（Scalar）或非向量（Wovector），例如物質的密度、電子的電量、水的比熱、電容器的電容，圓的半徑等物理量均為純量。

若一個向量 $\vec{A}$ ，相當於兩個個別的向量 $\vec{B}$ 與 $\vec{C}$ 所合成，則稱向量 $\vec{A}$ 為向量 $\vec{B}$ 與向量 $\vec{C}$ 之和。寫成：

$$\vec{A} = \vec{B} + \vec{C} \quad (1-7)$$

兩向量相加時，可利用圖解法，以求得向量和。由圖 1-1 可看出當兩個向量 $\vec{B}$ 與 $\vec{C}$ 相加時，若 $\vec{C}$ 的尾端與 $\vec{B}$ 的首端相連，則其向量 $\vec{A}$ 為從 $\vec{B}$ 的尾端指向 $\vec{C}$ 的首端所形成的向量。因為 $\vec{A}$ 與 $\vec{B}$ 、 $\vec{C}$ 之間構成一個三角形，所以這種求向量和的方法，通常稱為三角形法。

此外，我們也可以利用平行四邊形法來求向量和。如圖 1-2 所示，將兩向量 $\vec{B}$ 、 $\vec{C}$ 的尾端連接在一起，然後以此兩向量為邊作一平行四邊形。則兩向量之和即為 $\vec{B}$ 與 $\vec{C}$ 之尾端至平行四邊形對角之向量 $\vec{A}$ 。若將 $\vec{B}$ 平移至對邊，則為前述之三角形法。

於圖 1-2 中，向量 $\vec{B}$ 、 $\vec{C}$ 之和為 $\vec{A}$ ，反之，我們亦可將向量 $\vec{A}$ 分解成 $\vec{B}$ 與 $\vec{C}$ ，則 $\vec{B}$ 、 $\vec{C}$ 稱為 $\vec{A}$ 的分量（Components）。顯然地，我們可將任一向量分解成無限多組分量，然而一般最常用的是將一向量