

交直流電路基礎

張 啓 人 編 著

大東書局出版

交直流電路基礎

張啓人編著

大東書局出版

本書詳細論述中級電工學中之靜電學、電磁學及電路部分，其重點則在基本電路知識。本書基本上係根據一九五二年中央人民政府教育部推薦蘇聯中等技術學校的電工學教學大綱之前半部編著而成的。在內容上又根據了國內一般工業性質中等技術學校的要求，由作者進行了若干取捨，並添進了較多的新材料。例如，對學生較難理解的矢量關係及其代數運算——複數，均有較詳細而淺近的說明。爲了使程度較好或要求較高的學生得到進修，書中添入了教學大綱中所沒有的「耦合電路」，但佔據的篇幅不多。又對三相交流電，則較一般書中所論，更爲詳盡。書末並附有附錄，包括符號量名對照、習題及答案、數學基礎複習及並聯阻抗的圖解法等。全書在編排上共分五編：緒言、直流電路、單相交流電路、耦合電路及三相交流電路。其中以單相交流電路之論述最詳，爲全書之重點，電磁學則分別冠於前三編之首。所用數學工具，不出初等三角學之範圍，複數運算則可直接從書中領會。本書適於作中等技術學校電工學電路部分之教本或參考書，大學非電工專業本專科學生及具有相當於高中程度之技工或技術人員均可用爲學習參考之用。

張啓人編著 丁士鈞校閱

1954年7月發排•1954年11月上海第一版

1954年11月上海第一次印刷(0001—2000)冊

書號：5018•30''×42''•1/25•150千字•81⁶/25印張•定價10,500元

大東書局(上海福州路310號)出版發行

上海市書刊出版業營業許可證出C四三號 上海市書刊發行業營業許可證發C六一號

華文印刷所(上海威海衛路357弄12號)印刷

序 言

隨着國家社會主義工業化迅速增長的同時，電工技術勢必將得到進一步的發展。這是因為在任何工業生產部門都不會也不能離開電能的使用。因此，對於電工的基本理論知識是每一個建設幹部所必需掌握的。

然而在電工技術的基本理論中，最重要的問題厥惟“電路”。從電信工程中的電話、電報、無線電廣播以至電力工程中的發電、輸電、配電及用電，始終貫穿着電路的應用和用以指導應用的電路理論。因此，即謂整個電工技術就是電路的技術問題，我想亦不為過。但在一般電工學中，對電路問題常感過於簡畧，語焉不詳，初學者極不易融會貫通，而國內較淺近的專門討論電路的書籍，尚不多見。本書就是想在這一目的下，給初學電工技術者在電路學習上開一孔道。內容基本上根據高教部推薦的“蘇聯中等技術學校電工學教學大綱”編寫，由於考慮到一般初學者對電工學中矢量圖及複數運算，常易模糊，故在這方面講述較為詳盡。書中添入的耦合電路一編，為交流電路組成部分，書中畧已述及，非本書重點，不是專攻電工的，畧去後並無妨於以後學習。所用數學工具，主要為三角與代數，個別地方涉及初等微積分，故適合一般工業性質中等技術學校及大專學校非電工專業學生之用。中級技術人員可用為參考或進修。

書中專有名詞，悉用中國科學院出版“物理學名詞”中所列。搜集

之數十則例題，將有助於電路問題之理解。個別摘譯自書末所列外文參考書中，附此聲明。

編撰本書之際，多承田志仁、程祖瑜諸兄協助製圖；家母郭懿君老師大力支持。原稿完成後，又承無線電工程系副主任陸鍾祚教授校閱，指出錯誤多處，謹此一併誌謝。

雖書稿校改者再，終因個人學識有限，疏漏不當之處，定不能免，還祈讀者、專家，隨時投函指正。

張 啓 人

一九五四年六月於南京工學院

目 錄

序 言

緒 論

第一章 電學基礎 1

(1.1) 電子 1

(1.2) 電場、電場強度與電位 3

(1.3) 導體與介質 9

(1.4) 電流 11

(1.5) 電動勢 13

(1.6) 電池與電化學 14

第二章 直流電路 17

(2.1) 直流概念 17

(2.2) 歐姆定律 18

(2.3) 電壓和電流的測定 18

(2.4) 反電動勢和電動勢源的路端電壓 19

(2.5) 高電壓與低電壓——保護接地 20

(2.6) 基爾霍夫定律 21

(2.7) 電阻、電阻係數與電導 24

(2.8) 電阻的串聯與並聯 25

(2.9) 電池之串聯與並聯 27

(2.10) 功和功率	28
(2.11) 電能轉變為熱能	29
(2.12) 導線的發熱與冷卻	31
第三章 電磁學基礎	32
(3.1) 電磁現象	32
(3.2) 載流導線所受到的力	34
(3.3) B 和 H 的關係	36
(3.4) 電磁感應	37
(3.5) 楞次定律	40
第四章 正弦波交流電動勢及其表示法	42
(4.1) 交流概念	42
(4.2) 正弦波	43
(4.3) 正弦波電動勢的產生	45
(4.4) 週期、頻率、相角	49
(4.5) 兩正弦波的相位差	52
(4.6) 正弦波的平均值	53
(4.7) 有效值(根均方值)	56
(4.8) 波形因數與巔值因數(波峯因數)	59
(4.9) 疊加正弦波的求法	60
(4.10) 矢量和矢量圖	64
(4.11) 矢量代數——複數運算	68
(4.12) 複數的指數型和極型的表示	73
(4.13) 正弦交流電的複數表示法	76
第五章 串聯和並聯交流電路	78
(5.1) 自感	78

(5.2) 電容	79
(5.3) 純電阻與交流電的關係	83
(5.4) 純電感與交流電的關係	83
(5.5) 純電容與交流電的關係	85
(5.6) 小結	87
(5.7) 電阻電感電容的串聯電路	88
(5.8) 電阻電感電容的並聯電路	100
(5.9) 單相交流電路的功率	104
(5.10) 功率因數之改進	116
(5.11) 電功率的測定	120
(5.12) 混聯電路	124
(5.13) 串並聯共振電路	134
第六章 耦合電路	141
(6.1) 傳導性耦合電路	141
(6.2) 互感	143
(6.3) 磁性耦合電路	144
(6.4) 變壓器耦合	147
(6.5) 空心變壓器耦合	148
第七章 三相交流電源	151
(7.1) 多相制——三相電勢的產生	151
(7.2) 三相交流電勢的數式	152
(7.3) 雙腳註	153
(7.4) 三相交流電的聯接法	154
(7.5) 三相交流電源的電壓關係	155
(7.6) 三相交流電源輸出電流關係	158
(7.7) Δ 與Y的互換等值網絡公式	159

第八章 三相電路的負載及功率	161
(8.1) 負載及其連接法	162
(8.2) 不平衡負載例題	163
(8.3) 三相四線制——中線迴路	165
(8.4) 三相平衡系統的功率	167
(8.5) 三相電路的功率測定	169
(8.6) 三相制小結	173
附 錄	174
1. 常用的幾種數字與單位換算表	174
2. 數學摘要	176
3. 習題	177
4. 並聯阻抗的圖解法	198
主要參考書目	201

第一章 電學基礎

(1.1) 電子

組成物質的基本單位是原子。簡單點說，原子由帶負電荷的電子、帶正電荷的質子和不帶電荷的中子三種微粒所組成。質子和中子構成原子核。質子所帶的電荷量和電子所帶的電荷量大小相等；但性質相反。由於整個原子是呈中性的，所以每一個正常的原子內，質子的數目與電子的數目恆相等。從質量上看，質子和中子的質量相等，均為 1.67×10^{-27} 公斤。但電子的質量却是 9.1×10^{-31} 公斤。可見質子或中子的質量要比電子大 1848 倍，整個原子的質量幾乎完全集中在原子核。

電子的電荷量經測定是：

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ 庫侖} \textcircled{1}$$

若用 m 代表電子的質量，則單位質量所帶有的電荷量是：

$$\text{荷質比} \frac{e}{m} = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{9.1 \times 10^{-31}} = 1.759 \times 10^{11} \text{ 庫侖/公斤}$$

這個龐大的數字說明了，儘管電子的電荷量十分微小，但由於它的質量也非常之小，因而單位質量裏具有的電荷量却大得驚人。這種性質就使得電子的運動，電子的變更速度，在電場力 $\textcircled{2}$ 的作用下，特別靈活，好像沒有慣性量（即質量）一樣，只在電子接近光的速度時，根據相對論，

$\textcircled{1}$ 定義見第(1.2)節。 $\textcircled{2}$ 其意義見第(1.2)節。

其慣性量才有顯著的增加。

在原子裏，電子依着各種互相隔開的軌道繞着原子核旋轉，這些軌道組成七個相近的層，即從近核的 K 層數起，依次為 K 、 L 、 M 、 N 、 O 、 P 、 Q 層。在最外一層上旋轉的電子叫做價電子，主要決定該原子的化學性質，核外電子的數目就是該原子的原子序數。圖 1 表示鋰原子的模型，它的電子軌道一共有 2 層，最外一層的電子數是 1。因此在化學分析上它是穩定的價，是正一價或負七價。其核外電子數目為 3，因此在門德雷葉夫週期表中，它是在第三位上。

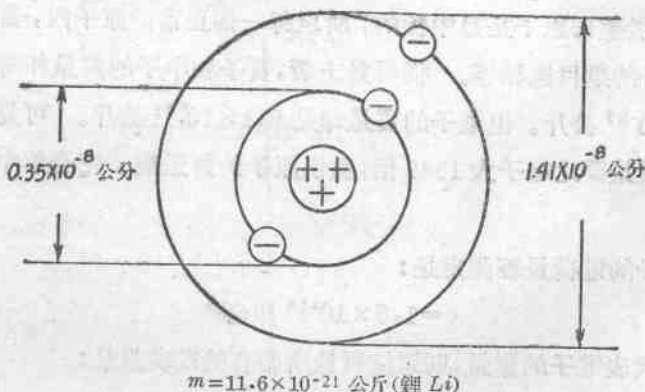


圖 1 鋰原子的模型

原子的直徑約在 3×10^{-10} 公尺左右；原子核的直徑則在 10^{-14} 公尺附近；電子的直徑大概是 4×10^{-15} 公尺；可見電子要比原子小五萬多倍，原子裏實際上空處很多。有人把原子比作世界上最大的城——南京，而把電子比作一塊城牆磚。由於電子體積小、質量小，但相對的電荷量却很大的這些性質，使人類能利用來為他們的和平建設服務，例如加熱於導體，以獲得大量的電子發射，從而有可能製造電子管和各種電

子儀器，人們又利用電子受電場作用後被加速的效應，製成電子迴旋加速器，用於近代物理的研究。

電之所以易於控制，能夠將電能傳送到很遠，能夠擔任極其複雜的工作，首先要歸功於電子。透徹了解電子的性能和它與原子的關係，對今後討論導體、介質、電流時，將有所裨益。

(1.2) 電場、電場強度與電位

一切電的現象都產生於電荷的存在或電荷的運動。貓皮與琥珀摩擦，可以使兩者各帶有等量異性的電荷。這種電荷是靜止的，可以經過靜電感應，使其他非帶電體帶電；感應所生的電總與原帶電體所荷的電性質相反。

同號的電荷相斥；異號的電荷相吸。排斥和吸引的力，由庫侖定律決定：各帶電量 Q_1 和 Q_2 的兩電荷，若相距 r 距離，則該兩電荷上所受的斥力或吸力應與兩電荷量的乘積成正比，而與兩電荷間距離的平方成反比。寫成數式得

$$F = \pm K \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (1.2.1)$$

式中， F 代表斥力或吸力（視式中負號或正號而定）。 K 是一個比例常數，在公尺、公斤、秒的單位制中， $K = \frac{1}{4\pi\epsilon}$ ，而 ϵ 叫做介電係數，隨電荷所在的環境而異其值，它的意義將在下節中再討論。這樣，如果力的單位用牛頓，介電係數的單位為法/米， r 的單位用公尺，則 Q 的單位便定義做庫侖。

我們用電通線來表示正電荷與負電荷之間的電現象，電通線即電荷的力線，是在說明電荷之間的電現象時所假定的。假定電通線是由正電荷出發終止於負電荷，且 Q 庫侖的正電荷發出 Q 根電通線， Q 庫

命的負電荷則接受 Q 根電通線，則在電通線所及的區域，一定存在有對外加電荷的作用力；因為電通線的分佈直接表示了電荷力的分佈情況如圖 2 (a)。實際上，空間存在的電荷，如果沒有週圍電環境的影響，在

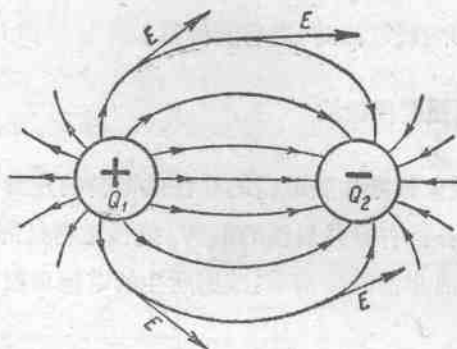


圖 2 (a) 電荷所形成的電場用電通線來表示

它週圍的任一點，都足以使得其他的電荷感受到力的作用。不過在實驗這種力的作用時，試探用的電荷往往會影響原來的空間孤立電荷單獨所形成的電通線區域或電通線場，也就是一種電力場或電場（正好比存在於宇宙空間的萬有引力場一樣）。不過，在我們實驗時，往往把試探電荷取得很小，假設試探電荷對孤立電場的影響忽畧不計。於是，單位電荷在電場中某一點所受到的力的牛頓數，便稱之為這一點的電場強度，單位是牛頓/庫侖。用數式表示，若 ϵ 表示電場強度， F 表示庫侖力， Q 表示試探電荷的電荷量，則：

$$\epsilon = \frac{F}{Q} \quad (1.2.2)$$

Q 是純數，故 ϵ 的方向與 F 的方向相同，就等於試探電荷所在位置電通線的切線方向。

例 1. 某空間電場的電場強度 $\epsilon = 4000$ 牛/庫，如果置入一電荷 $Q = 0.001$ 庫侖於該電

場中，並設對原來電場的影響可以不計，求這電荷所受到的庫侖力。

解：依(1.2.2)式，得

$$F = Q\varepsilon = 0.001 \times 4000 = 4 \text{ 牛頓}$$

實際上，要得到產生這樣大的力的條件，是異常困難的。

上面我們討論的電場是在空間孤立的，這不過是一種理想情況。宇宙間電荷的存在情況錯綜複雜，電荷所產生的電場的存在情況，也同樣變化萬千。只有在充分掌握電場的規律和性質以後，我們才有可能利用電場。電場本身並不是一種空想的描述方法，它是客觀地存在的，是一種物理的實有現象，一種科學法則。在電場裏力的傳播，亦即動電場的變化，具有一定的速度，決不如唯心論者所謂電場力不需要介質和時間的超距作用。

總起來說，可以這樣來解釋電場：“假若由電荷所產生的一個力，在某一點（在真空中或在實體內），作用於一個帶電體上，這一點便有電場存在，它不一定由單個電荷所產生，也可由幾個電荷產生，或由分佈在線上、面上、立體上的電荷所產生”。

現在我們進一步來討論電位的概念。當電荷 Q 在電場中移動，電場的力對電荷就做了功。如果電荷 Q 在電場中移動了一個微小距離 ΔS ，而移動的方向和電場的方向之間的夾角是 φ ，那麼電場在電荷上

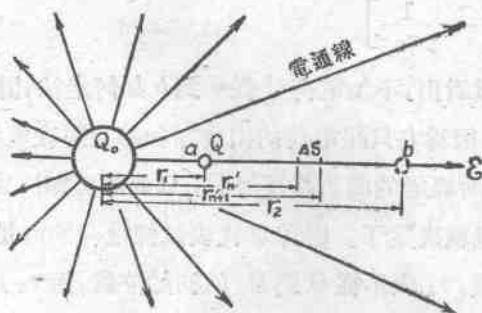


圖 2(b) 電荷在電場中的移動

做的功,就是:

$$\Delta A = F \cdot \Delta S \cos \varphi = Q \epsilon \Delta S \cos \varphi \quad (1.2.3)$$

如果 $\varphi = 0$, 就表示電荷順着電場方向移動, (1.2.3) 式就變成

$$\Delta A = F \cdot \Delta S = Q \epsilon \Delta S \quad (1.2.4)$$

現在電荷若從 a 到 b (見圖 2 b), 所作的功等於各微小路程上功的總和, 即:

$$A = \Sigma \Delta A = \Sigma Q \epsilon \Delta S \quad (1.2.5)$$

由 (1.2.1) 式和 (1.2.2) 式知道

$$\epsilon = \frac{F}{Q} = \frac{Q Q_0}{4 \pi \epsilon r^2} \cdot \frac{1}{Q} = \frac{Q_0}{4 \pi \epsilon r^2} \quad (1.2.6)$$

表示點電荷 Q_0 , 所形成的電場的強度, 以之代入 (1.2.5) 式便得:

$$A = \Sigma \frac{Q Q_0}{4 \pi \epsilon r^2} \Delta S \quad (1.2.7)$$

如果 ΔS 取得極小, 那麼 $\Delta S = r_{n'+1} - r_n'$ 中 $r_{n'+1}$ 和 r_n' 是很接近的, 在這一範圍內 r 變動得非常小, 因此, r^2 可直接寫成 $r_n' r_{n'+1}$, 於是:

$$\begin{aligned} A &= Q Q_0 \Sigma \frac{\Delta S}{4 \pi \epsilon r^2} = \frac{Q Q_0}{4 \pi \epsilon} \left[\frac{r_1' - r_1}{r_1 r_1'} + \frac{r_2' - r_1'}{r_1' r_2'} + \frac{r_3' - r_2'}{r_2' r_3'} + \dots \right] \\ &= \frac{Q Q_0}{4 \pi \epsilon} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1'} \right) + \left(\frac{1}{r_1'} - \frac{1}{r_2'} \right) + \left(\frac{1}{r_2'} - \frac{1}{r_3'} \right) + \dots \right] \\ &= \frac{Q Q_0}{4 \pi \epsilon} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (1.2.8) \end{aligned}$$

從上式可以看出, 不論電荷 Q 從 a 到 b 如何走法, 計算出來的總功永遠是恆定的; 因為它只跟電荷的出發點和終止點在電場裏的位置有關, 而與路程中所經過的曲折路徑無關, 只要起迄點決定了, 電場對電荷所作的總功也就決定了。因為 Q 代表試探電荷的電量, Q_0 代表產生該電場的電荷量, r_1 表示從 Q 到 Q_0 的初始位置, 而 r_2 則表示從 Q_0 到 Q 的終極位置。顯然, Q 和 Q_0 是早已知道的, 作功的多少, 其因素便只

剩下 r_1 和 r_2 的長度了。

單位陽電荷從 a 點到 b 點電場所做的功，稱為電位差。從(1.2.8)式，如令 V_a 代表點 a 的電位， V_b 代表點 b 的電位，那麼 a 點與 b 點之間的電位差便是：

$$V_{ab} = V_a - V_b = \frac{Q_0}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{Q_0}{4\pi\epsilon r_1} - \frac{Q_0}{4\pi\epsilon r_2} \quad (1.2.9)$$

從電位差的概念，我們可以直接獲得電位的定義。因為可以把 V_a 和 V_b 寫成：

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{Q_0}{4\pi\epsilon r_1} + C \\ V_b &= \frac{Q_0}{4\pi\epsilon r_2} + C \end{aligned} \quad (1.2.10)$$

式中 C 是任意的常數，不論 C 是什麼數值， $V_a - V_b$ 總還是如(1.2.9)式所表示。可見電位只是一種相對的概念。如果要求出在電場中某一點電位的絕對值，就必得選定適當的常數 C ，這常數的大小是任意的。我們為了方便起見，可以在空間任一點選作電位為零，然後再拿其他各點的電位和這一點作比較，這樣，其他各點的電位便定出來了。

現在我們將 b 點設想在無限遠的地方，即令 $r_2 = \infty$ ，(1.2.9)式的最後一項就變成了零，或：

$$V_a - V_\infty = \frac{Q_0}{4\pi\epsilon r_1} \quad (1.2.11)$$

也就是說：

$$V_a = \frac{Q_0}{4\pi\epsilon r_1} + V_\infty \quad (1.2.12)$$

把上式與(1.2.10)式比較，可見 V_∞ 與常數 C 相當，現在假令無限遠處的電位是零，即 $V_\infty = C = 0$ ，則：

$$V_a = \frac{Q_0}{4\pi\epsilon r_1} \quad (1.2.13)$$

這時由於 b 點的移到無限遠處，而將 a 點電位的絕對值相對地定出來了；因此，把無窮遠的地方的電位，當成零是很方便的。一般說來，在電場中任何一點的電位，在數值上等於單位陽電荷由該點移到無限遠處電場對它所做的功，或即單位陰電荷由無窮遠處移到該點對電場所完成的功。

由於地球的半徑 R 非常大，因此，儘管地面上有時會累積有相當數量的電荷 Q ，仍將使 $Q/4\pi\epsilon R$ 的結果非常小，幾乎近於零。因此，大地的電位異常穩定，人們都把地球的電位取做零電位，而其他的電位值，都可視為與大地之間的電位差，這樣十分方便，也夠準確。

電位的單位可以由定義導出來，它是每庫侖所完成的功。功的單

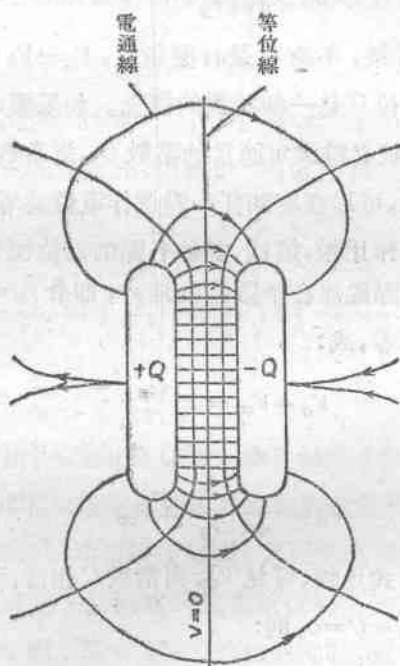


圖 3 平行板電極所形成的電場中，等位線和電通線的分布情形