

部定大學用書

電 工 學

—電機電子工程學—

(中 冊)

國立編譯館大學用書編審委員會主編

張 煌 編 著

國 立 編 譯 館 出 版
臺 灣 中 華 書 局 印 行

部定大學用書

電 工 學

—電機電子工程學—

國立編譯館大學用書編審委員會主編

張 煌 編 著

國 立 編 譯 館 出 版
臺 灣 中 華 書 局 印 行

中華民國六十一年十二月初版

部定大學用書
電 工 學 (中冊)

電機電子工程學

平裝版 售價每本九角

(郵運滙費另加)

國立編譯館大學用書編審委員會

張 燧 館

國 立 編 譯 館

臺灣中華書局股份有限公司代表

熊 鈍 生

臺北市重慶南路一段九十四號

臺灣中華書局印刷廠

臺北市雙園街六〇巷九〇號

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, Section 1, South Chungking Road, Taipei, Taiwan, Republic of China



主 編 出 發 印 發
編 著 版 行 刷 行
者 者 者 人 者 處

(臺總)甲書

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

中冊目次

第三篇 電 子 學

第十五章 電子理論..... 603

15-1	構成物質的電子.....	603
15-2	能階和能帶.....	614
15-3	金屬中的傳導.....	620
15-4	金屬內電子的能量分布.....	629
15-5	工作函數.....	643
15-6	熱離子發射.....	648
15-7	接觸電位.....	654
15-8	逸出電子的能量.....	657
15-9	加速電場發射.....	661
15-10	二次發射.....	664
15-11	氣體中的放電.....	666
15-12	純半導體中的傳導.....	672
15-13	半導體中的雜質效應.....	683
15-14	光電效應.....	689
15-15	電子在電場或（及）磁場中運動.....	698
	問題.....	713

第十六章 電子物件..... 721

16-1	真空兩極管·····	721
16-2	真空三極管·····	735
16-3	真空四極管和五極管·····	750
16-4	含氣管·····	757
16-5	光電管·····	767
16-6	X射線管·····	772
16-7	半導體兩極體·····	776
16-8	電晶體·····	788
16-9	隧道兩極體·····	796
16-10	曾納兩極體·····	802
16-11	四層晶體·····	804
16-12	場效電晶體·····	813
16-13	單接面電晶體·····	825
16-14	積體電路·····	829
	問題·····	837

第十七章 電晶體特性····· 847

17-1	電晶體電流和接面電壓·····	847
17-2	基極接地式特性·····	852
17-3	射極接地式特性·····	859
17-4	集極接地式特性·····	866
17-5	Z - 參數, Y - 參數, 和 T - 參數·····	867
17-6	h - 參數·····	874
17-7	參數轉換·····	885
17-8	電晶體三種接地式 h - 參數轉換·····	890
17-9	電晶體和真空管的異同·····	897

問題	899
第十八章 放大器	904
18-1 放大器分類	904
18-2 放大器的靜態點，偏壓和偏流	906
18-3 圖解分析	922
18-4 真空管或場效電晶體直線性等效電路	931
18-5 聲頻電晶體直線性放大器等效電路	945
18-6 聲音的測量	959
18-7 放大器失真	963
18-8 電阻電容耦合放大器	965
18-9 高頻電晶體等效放大電路	975
18-10 反饋放大器	991
18-11 功率放大器	1021
18-12 射頻放大器	1041
問題	1056
第十九章 振盪器、調變器和檢波器	1073
19-1 正弦波振盪器	1073
19-2 調屏或調集振盪器	1077
19-3 柯匹子和哈特立振盪器	1081
19-4 晶體振盪器	1089
19-5 電阻電容振盪器	1093
19-6 負電阻振盪器	1099
19-7 調幅器	1101
19-8 調幅信號檢波	1110
19-9 調頻	1117

19-10	調頻信號檢波·····	1125
19-11	超外差式接收機·····	1131
	問題·····	1137

第二十章 整流器和電源供給····· 1145

20-1	半波整流器·····	1145
20-2	全波整流器·····	1154
20-3	濾波器·····	1158
20-4	分洩電阻器·····	1178
20-5	電壓調整器·····	1181
20-6	閘流管整流器·····	1191
20-7	輝光管電路·····	1197
	問題·····	1201

第二十一章 特種電子電路····· 1206

21-1	限制電路·····	1206
21-2	定位電路·····	1215
21-3	直接耦合放大器·····	1232
21-4	射極隨耦器·····	1251
21-5	對相放大器·····	1255
21-6	不穩多諧振動器——習用電路·····	1265
21-7	不穩多諧振動器——串級與直接耦合電路·····	1273
21-8	單穩多諧振動器·····	1284
21-9	雙穩多諧振動器·····	1294
21-10	間遏振盪器·····	1305
21-11	鋸齒電路·····	1310
21-12	果積計數電路·····	1337

21-13	脈衝電路.....	1342
21-14	運算放大器.....	1347
21-15	邏輯電路.....	1356
21-16	十進位電路.....	1363
	問題.....	1375
索 引		1384

第叁篇 電子學

第十五章 電子理論

電子學一詞，顧名思義，當爲研究電子的科學。但是有關研究電方面的科學，均將涉及而用到電子流動的觀念，因此，電子學研究的範圍，不易明顯。本篇電子學係指研究產生電子流動的物件，及其基本電路的科學。

產生電子流動的物件，簡稱爲電子物件。在研討電子物件及其電路之前，必須先行瞭解電子在物質中的情形，以及受到各種型式能量後，所有的效應，作爲知識的基礎。所以，電子學一篇先由電子理論開始講述。

15-1 構成物質的電子

物質由分子組成，而分子則由原子所組成，原子又係由更小的微粒 (particle) 所組成，它們像行星環繞着太陽運行一樣。這些像行星的微粒就是電子，像太陽的稱爲原子核。電子帶有負電荷，原子核帶有正電荷。

各種原子各有一定數量的電子。但是在一個原子裏，環繞着原子核運行的電子數目等於核內的正電荷數目。這些正電荷稱爲質子。除了質子外，核內尚有電性中和的微粒，稱爲中子。所有各種元素的原子，其原子核含有不同數目的中子，核外環繞着的電子數目常等於核內的質子數目。

電子既然循着一定軌道環繞着原子核運行，在原子外層軌道中的電子對於原子核的引力，較內層軌道中的電子爲小。其最外層的電子稱爲價電子，容易脫離軌道，又稱自由電子。其內層的電子，由於不容易被迫離開軌道，稱爲束縛電子。自由電子的流動形成電流，本章所理論的是自由電子。

一個電子帶有的負電荷，可用米立坎 (Millikan) 的油滴實驗或法拉第 (Faraday) 的電解測定，求得爲 1.602×10^{-19} 庫侖。由於 1 安培電流爲每秒 1 庫侖電荷的流動，則 1 微微安電流 (10^{-12} 安培) 約爲 $6 \times 10^6 (= \frac{10^{-12}}{1.602 \times 10^{-19}})$ 電子的流動。

電子除了帶有負電荷外，它尚具有一定的質量。要直接測定電子的質量，到現在爲止還沒方法，因爲電子在原子內是在轉動，脫離原子亦在運動，所以不能以通常的觀念去稱它。一般以間接的方法，先測定其電荷與質量 e/m 之比，用湯木生 (Thomson) 電與磁的偏轉法，質譜儀的電加速與磁偏轉法，或卜西 (Busch) 的電子螺旋法，均可獲得 e/m 的比值爲 1.759×10^{11} 庫侖/公斤。從這數值，將電子的電荷代入，計算出電子的質量爲 9.109×10^{-31} 公斤。電子的半徑估計約爲 10^{-15} 公尺，它們是如此之小，將可視其爲一點。

將電子視作包含電荷及質量的微粒，適用於古典型式。對於巨大型標度現象，例如電子在電場或磁場中運動，應用牛頓 (Newton) 定律，能精確的決定其軌跡行程。但是，對於微小型標度現象，例如在原子或晶體內的電子，如應用牛頓力學來處理古典型式，其結果將不會與實驗所得者符合。此時，須應用波動力學，將電子視作一種波的性質。

當電子被視作微粒行爲時，它在電場中運動的速度，可應用公式 (1-13), (1-15) 或 (1-16) 而求得。以公式 (1-15) 而言，其速度 v

$= (\frac{2eV}{m})^{\frac{1}{2}}$ ，電場中所加的電壓 V 高，其運動的速度必然大。以公式表面視之，若電壓陸續增高，速度似乎可至無窮大。其實則不然，電子的速度在最大時僅能接近於光的速度。

在相對論中曾假設質量與能量的等效依照下列公式，即

$$W = m c^2 \quad (15-1)$$

此處 W 為總能量焦耳， m 為質量公斤， c 為在真空中光的速度每秒公尺。根據此一理論，一微粒的質量將隨其能量而增大，因此，亦將隨其速度而增大。

倘使一電子在 A 點以零速度開始，到達 B 點時有一速度 v ，則此電子的能量必然增加 eV ，此 V 為 A 與 B 兩點間的電位差。以公式表之，則

$$eV + m_0 c^2 = m c^2 \quad (15-2)$$

此處 $m_0 c^2$ 為在 A 點具有的能量。 m_0 以靜電質量著稱，為一常數，而與電子速度無關。

電子在電場中所受的力，應用公式 (1-6), (1-17), 及 (15-2), 得

$$F = -e\epsilon = e \frac{dV}{dx} = c^2 \frac{dm}{dx} \quad (15-3)$$

再照牛頓第二定律而言，力為動量的變更。因此

$$F = \frac{d}{dt}(mv) = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt} \quad (15-4)$$

公式 (15-3) 與 (15-4) 為相等，

$$m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt} = c^2 \frac{dm}{dx} = c^2 \frac{dm}{dt} \cdot \frac{dt}{dx} = \frac{c^2}{v} \cdot \frac{dm}{dt}$$

或

$$m v dv + v^2 dm = c^2 dm$$

將其整理，可列成

$$\frac{dm}{m} = \frac{v dv}{c^2 - v^2} \quad (15-5)$$

將此公式(15-5)積分，並將起始情況 $v = 0$ 時 $m = m_0$ 代入，則得電子的質量 m 爲

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (15-6)$$

將公式(15-6)代入公式(15-2)，得

$$eV + m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$\text{或} \quad V = \frac{m_0 c^2}{e} \left[\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right] = V_N \left[\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right] \quad (15-7)$$

$$\text{此處} \quad V_N = \frac{m_0 c^2}{e} = \frac{9.11 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^8}{1.60 \times 10^{-19}} = 5.11 \times 10^5 \text{ 伏特,}$$

再者，

$$\frac{V}{V_N} = \frac{eV}{m_0 c^2} = \frac{2eV}{m_0} \cdot \frac{1}{2c^2} = \frac{v_N^2}{2c^2} \quad (15-8)$$

此處 $v_N = \sqrt{\frac{2eV}{m_0}}$ ，爲質量中相對變更略去後的速度，與公式(1-

15)相似。

由公式(15-7)，求解 v ，得電子的真速度爲

$$v = c \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{V}{V_n}\right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} = c \left[1 - \frac{1}{(1 + v_N^2/2c^2)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15-9)$$

在此公式中，即可獲悉電子的速度決不會大於光的 速度。如將公式 (15-9) 中的二項式展開，則得

$$v = v_N \left(1 - \frac{3}{4} \frac{V}{V_N} + \dots \right) = v_N \left(1 - \frac{3}{8} \frac{v_N^2}{c^2} + \dots \right) \quad (15-10)$$

由此公式中可以看出，倘使電子的速度甚小於光的速度，公式 (15-10) 中第二項以下均可略去，則電子速度 $v = v_N$ ，公式 (1-15) 可以應用，作沒有相對關係時處理。在任何特別情況下，應用簡單的古典公式 (1-15) 的誤差，可從公式 (15-10) 中獲知。例如，電子速度是光速的十分之一時，公式 (15-10) 指出，倘使速度採取 v_N 代替 v ，則其誤差僅為百分之一的八分之三。為使電子速度到達光速的百分之十，它必須在電場中經過的電位差，由公式 (15-8) 求得為 2,560 伏特。因此，如電子受 3 仟伏電位差作用時，電子速度須應用公式 (15-10) 予以改正。

將電子視作一種波 (wave)，這種觀念起初似乎格格不入，難以接受。但當想起在七八十年前物理學開宗明義的能量不減定律尚且很難適應日常經驗時，就可預測今後不難瞭解電子是波的這種學說。

1924 年德布各利 (De Broglie) 已預示電子是一種波，在 1927 年德維生 (Davisson) 與革末 (Germer) 發現它的性質而測量電子的波長，他們的工作不久由湯木生用不同的實驗方法予以證實。於是，電子除了有微粒的性質外，又增加了波的性質，它具有兩種性格。

德布各利的假設發軔於光子蒲郎克 (Planck)，解釋每個光子的能量 W 與其輻射頻率 f 的公式爲

$$W = hf \quad (15-11)$$

此處 h 爲蒲郎克常數 6.626×10^{-34} 焦耳秒。

頻率 f 的數值是由測量輻射的波長入計算而得，其關係爲

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (15-12)$$

此處 c 爲光的速度 2.998×10^8 公尺/秒。將公式 (15-12) 代入公式 (15-11)，得光子的能量爲

$$W = \frac{hc}{\lambda} \quad (15-13)$$

測量波長可利用波動的特性現象，干涉或繞射實驗方法。

在 1923 年康普吞 (Compton) 觀測 X 射線的光子與電子的相互作用，證實光子有其動量，如 m 爲光子的質量，根據相對論的假設，能量與質量的關係如公式 (15-1)，由公式 (15-13) 與 (15-1)，可得波長

$$\lambda = \frac{h}{mc} = \frac{h}{\text{光子的質量} \times \text{光子的速度}} \quad (15-14)$$

此爲光子的波長與其動量的公式。由於這一公式，德布各利以爲在這方面一些波的行爲可像微粒，爲什麼在某方面，其微粒如電子者，它的行爲不能像一些波呢？因此他假設電子有波的性質，其波長與動量的關係與公式 (15-14) 相類，即

$$\lambda = \frac{h}{\text{電子的質量} \times \text{電子的速度}} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p} \quad (15-15)$$