

實用工業電子學

施 彬 編

龍門聯合書局出版

序

工業電子學是闡述各種電子器械的作用原理及其應用在工業上的一種科學。藉着各種電子管的作用，使電力驅動、自動化控制、儀器製造、電焊及金屬和非金屬的熱處理與溫度的自動調節等許多困難的問題，獲得了解決。在蘇聯，工業電子學已經廣泛地發展，而且取得了極大的成就。際此祖國正在進行大規模經濟建設逐步實現國家的社會主義工業化的時候，工業電子學的應用，將是技術革新的最有效的方法，正如蘇聯一樣，它的發展是有廣闊的遠景的，所以目前各大專學校的動力系科都設置這一專門課程。

關於電子學的書籍，國內已有很多的著作出版，其內容則偏重於電訊方面，雖其原理和電路可作工業上的應用，但欲求專門敘述工業上應用的電子學書籍，則為數極少；因此本書的編纂是必須的。

本書共計十八章，可分三個階段：第一階段首先說明電子、離子及光子的概念；繼述各種電子管的構造和原理，並分析各種整流器、逆換流器、放大器和振盪器的電路及它們在工業上的應用。第二階段是屬於工業上實用的電子控制方面，先述各種電子控制的基本電路，然後依次敘述直交流電動機和發電機的自動電子控制，感應電熱和介質電熱的原理、應用和構造，電阻電焊及電熱溫度的自動電子調節以及各種光電裝置。第三階段為利用電子組成的儀器方面，其中包括真空管電壓計、陰極射線示波器 X 射線機、電子顯微鏡以及各種功率轉送器，如電阻應變儀、差動變壓器及加速計等。

本書對基本原理方面作簡單的數學分析，盡量避免高深數學，藉求普遍。並在有關基本原理的各章末了，附有習題，能幫助讀者瞭解其意義，以便於自修和着重於原理的運用。

編者謹向在編寫過程中隨時提供寶貴意見的邱鎔材、汪世襄、鄧漢馨諸同志致謝。

本書可作為大專學校的教材，亦可備為技術工作者參考之用，但編者學識有限，兼以時間倉促，謬誤難免，希望讀者提出寶貴意見，作為以後修正的指針。

施 彬 謹識 一九五四年七月

目 錄

序	1
第一章 電子、離子及光子	1
1-1. 原子的結構	2
1-2. 固體中的電子	5
1-3. 電子放射	6
第二章 實用的放射體和兩極管	9
2-1. 熱放射定律	9
2-2. 實用的放射體	10
2-3. 陰極的構造	12
2-4. 兩極真空管的特性	13
2-5. 兩極管的構造	15
2-6. 半導體整流器	16
第三章 單相整流電路	19
3-1. 用均勻電容器的半波整流電路	19
3-2. 用均勻電容器的全波整流電路	21
3-3. 電阻負載的全波電路	22
3-4. 全波橋形電路	23
3-5. 濾波器或均勻電路	24
3-6. 整流器的電壓調節	31
第四章 柵極控制真空管	34
4-1. 三極管	34

4-2. 三極管的特性曲線	35
4-3. 電壓放大	41
4-4. 負載線的分析	44
4-5. 動態特性曲線	46
4-6. 三極管的等值電路	46
4-7. 純電阻負載時的放大	48
4-8. 阻抗負載時的放大	49
4-9. 極際電容	50
4-10. 四極管	51
4-11. 五極管	53
4-12. 電子注-功率四極管	56
第五章 充氣管	60
5-1. 氣體中放電的基本原理	60
5-2. 輝光放電	62
5-3. 電弧放電	63
5-4. 輝光兩極管——穩壓管	65
5-5. 熱放射充氣兩極管	66
5-6. 熱放射充氣三極管——閘流管	70
5-7. 閘流管的交流控制	73
5-8. 控制閘流管發火的相移網絡	75
5-9. 控制閘流管發火的巔峯變壓器電路	77
5-10. 汞弧整流器	79
5-11. 引燃管	82
第六章 光電器械	85
6-1. 光學名詞	85
6-2. 光電放射管	86
6-3. 光電池	91
6-4. 光電導管	94

第七章 多相整流器及逆換流器	96
7-1. 三相星形接法	96
7-2. 雙星形接法	98
7-3. 三相橋形接法	99
7-4. 均勻濾波器	101
7-5. 可控整流器	102
7-6. 引燃管的發火	105
7-7. 效率及電壓調節率	107
7-8. 逆換流器	108
第八章 實用的放大電路	117
△ 8-1. 放大器的分類	117
8-2. 畸變	119
8-3. 電阻-電容-耦合電壓放大器	121
8-4. 直接-耦合放大器	127
8-5. 變壓器-耦合放大器	128
8-6. 阻抗的變量	130
8-7. 甲類三極管功率放大器	131
8-8. 甲類五極管功率放大器	136
8-9. 推挽式放大	138
8-10. 推挽原理的一般應用	141
8-11. 音頻放大器的整個電路	143
第九章 反饋	146
9-1. 反饋方程	146
9-2. 負反饋	148
9-3. 正反饋——振盪	149
9-4. 反饋的其他應用	152
9-5. 實用的負反饋電路	154

9-6. 陰極耦合器	155
第十章 調諧放大器及振盪器	159
10-1. 串聯諧振	160
10-2. 並聯諧振	163
10-3. 調諧放大器中諧振電路的作用	165
10-4. 配諧功率放大器	168
10-5. 功率振盪器	172
10-6. 振盪器的頻率控制	175
10-7. 寬範圍振盪器	177
10-8. 振盪的調制	179
10-9. 調幅波的產生和解調幅	185
第十一章 電子控制的基本電路	189
11-1. 替續器	189
11-2. 電子替續器電路	190
11-3. 閘流管定時電路	192
11-4. 飽和電抗器電路	195
11-5. 兩真空管並接的平衡放大電路	197
11-6. 用充氣兩極管來均勻和增加閘流管輸出的電路	198
11-7. 閘流管電子接觸器電路	199
11-8. 閘流管充電器	200
11-9. 鋸齒形波發生器	201
第十二章 電動機和發電機的電子控制	203
12-1. 直流電動機的基本電子控制電路	204
12-2. 直流電動機的整個電子控制電路	210
12-3. 用汞弧低頻變頻器的異步電動機的速率控制	215
12-4. 交直流發電機電壓的自動調節	218
12-5. 同步電動機功率因數的自動調節	220

12-6. 直流電動機的整步控制和交流發電機整步時的自動開關	221
--------------------------------------	-----

第十三章 工業電熱的電子控制.....224

13-1. 高頻電熱的原理和應用	225
13-2. 高頻電熱器的電路	229
13-3. 汞弧高頻變頻器	231
13-4. 電阻電焊的種類和運用方法	233
13-5. 電阻電焊利用電子控制的利益	237
13-6. 電阻電焊的電子接觸器電路	239
13-7. 電阻電焊的定時電路	239
13-8. 電阻電焊的熱量控制電路	243
13-9. 電阻電焊的儲能電路	245
13-10. 電弧電焊的電子控制	247
13-11. 電熱的溫度控制	248

第十四章 光電控制裝置.....256

14-1. 光電控制的基本電路	256
14-2. 自動記數、衡重及切削裝置	262
14-3. 光電保安裝置	264
14-4. 光電檢查裝置	266
14-5. 光電登記控制	270
14-6. 電梯的自動控制	274
14-7. 光電溫度控制和船舶的自動駕駛裝置	276
14-8. 光電溫度計	278
14-9. 光電直流放大器	280

第十五章 真空管電壓計.....282

15-1. 直流真空管電壓計的基本原理	282
15-2. 交流真空管電壓計	287

第十六章 陰極射線示波器	290
16-1. 陰極射線管	290
16-2. 陰極射線示波器	294
16-3. 重複波的顯現	296
16-4. 曲線的點繪	297
16-5. 相位的測定	298
16-6. 頻率的比較——利薩如圖型	299
16-7. 單純拂掠的暫態記錄	300
16-8. 用 z 軸調制的定時	301
16-9. 連續記錄	301
第十七章 X 射線機及電子顯微鏡	303
17-1. X 射線的產生和性質	303
17-2. X 射線機	305
17-3. X 射線在醫療方面的應用	308
17-4. X 射線在工業方面的應用	309
17-5. 百萬伏 X 射線機	310
17-6. 電子顯微鏡	313
第十八章 功率轉送器	316
18-1. 功率轉送器的一般原理	316
18-2. 電阻應變儀	318
18-3. 應變儀的電橋	320
18-4. 差動變壓器	325
18-5. 加速計	326
18-6. 記錄元件	328
附 錄	333
R-C 的放電方程	333

第一章 電子、離子及光子

電工學是專門討論電子和其他荷電質點的運動及其所屬的電場和磁場的一門科學。在它近百年歷史的最初 60 年中，電機工程方面主要研究了電子在導體中的流動情形，發明了電報、電話、電燈、電動機及發電機。這些重要的發明，使通訊傳遞加速，白晝增長，並提供了可以靈活操縱的動能，助長機械工程方面已有的各種重要發展。

從二十世紀開始，電機工業已逐漸發展，成爲國家經濟中的重要因素。發展了專門研究，同時這一門科學又轉入另一個重要的新方向——電子控制，新的科學叫做電子學。在這方面，首先有兩極真空管的發明，解決無線電收訊方面的困難；此後不久，在兩極管中又加上一個柵極，控制了通過管內的電流，這是一個基本的重要進展，使我們第一次能夠控制自由電子在空間的流動。再後，又有四極、五極、多極等各式各樣的真空管的發明；更從離子運動和光電效應的研究，發明了多種的充氣管及光電管。從此，使我們從單純的電力利用，轉到憑藉真空管、光電管及充氣管的作用，進行各種精確的控制，不獨促進電訊方面，如無線電、長途電話、電視及雷達等的發明，且爲工業方面，如整流和換流、檢驗、自動化控制及靈活調節等等開闢了新的大道。靠了電子學在工業上的應用，對於製造技術的改進、工作效率的增加、測定儀器精確度及靈敏度的提高、電動機應用範圍的擴大、勞動條件的簡化以及操作的保安和新產品的創造等，都有了輝煌的成就，而且這些應用還在繼續地擴展到各式各樣的工業和技術部門中去。

在研究利用電子、離子及光子等所構成的各種專門器械之前，我們首先應該探討這些電子、離子、光子等的物理性能。

1-1. 原子的結構

讀者在物理學中已熟知原子組織的幾何觀念，從這種觀察中指出：一堆小而濃密的質子和中子佔着原子中幾乎所有的質量，但其值極小。環繞着這堆核心有許多如衛星一樣的電子，在不同的圓形或橢圓形軌道上迴轉着。原子外層部份的電子數和其核心中的質子數相等，故它的淨得電荷是零。這種電子通常認為是最輕的負電荷。

圖 1-1 示一個原子的幾何圖型，連同其各質點數量、電荷及質量表。原子的化學和電子反應完全和其衛星狀電子的性質有關，所以這些都是我們所應注意的。

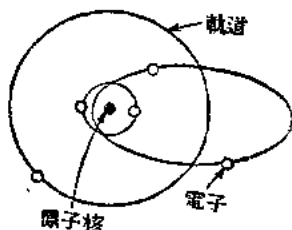


圖 1-1 原子的幾何圖型

質點名稱	質點數量	每個質點上的電荷	約計質量
電子	5	-1	$\frac{1}{1,850}$ *
質子	5	+1	1
中子	6	0	1
總計	16	0	11

* 以 $\frac{1}{16}$ 氧原子的原子單位計算的質量。

有了這個圖型，就容易解釋電子管的很多性質，但必須指出任何人都沒有看見過原子。這個圖型祇是用以做一個物理的支架，使我們便於解釋物理學家們所觀察到的各種不同現象。不過，要用它來做完全的觀察，那是不夠的。在很多情形下，電子似乎要靠電波的性質來解決；其原子的軌道長度是波長的整數值，這就限制了原子中容許的軌道數。

能量階層 另一種簡便的原子圖型，是以原子各種不同的可能電子軌道來代表其能量階層。圖 1-2 示氫原子的這種圖型。它只有一個做核的質子和一個單純的電子。這個電子在不被擾動時，無時不在找尋一條離核最近的軌道而停留

其上。這種情形就稱做原子的正常狀態，以圖中的底線來代表。對應着這條軌道的能量階層定它為零，並稱它為量子 1。離核稍遠的位置，依電子所需的適合波長，另有一條軌道存在，這一條軌道稱它為量子 2。因為核要吸引電子，欲將電子移至較遠的距離，必須有功加入；

因此，這個原子就有了比以前較大的能量。當電子從一個位置移到另一個位置時，這個原子就稱做在它的激勵狀態；將它移到第二個軌道時所需的能量，稱做第一個激勵能量。在正常狀態的原子，都得不到些微能量。

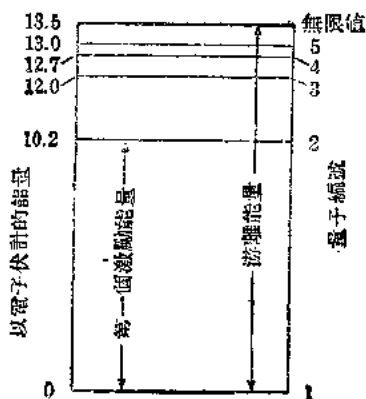


圖 1-2 氫原子中的能量階層

離核再遠些，存在着許多其他的容許軌道，以整數的量子 3, 4, 5 等直到無限大來表示，它們對應着將電子從原子中移出的全部情形。圖中所示，就是它們對應的能量階層。原子通常都不能在顯著的時間內保持其激勵狀態；當電子立刻跌回它的低階層時，其多出的能量就產生輻射能量或光。

游離 使電子完全從原子中跑出的過程，稱做游離。每一種指定的原子，必須有一定數值的功來使它產生游離，這個功稱做游離能量或游離電位。使氫游離，需要 13.5 電子伏的能量。一個電子伏等於一個單位電子電荷反抗 1 伏電位差而移動時所做的功，其值為 1.6×10^{-19} 焦耳。一個複雜的原子，有許多電子在一個、二個或甚至三個電子跑出時，能產生一次、二次或三次的游離。不過，在電子管中，這種複雜性的游離却很少碰到的。

使原子激勵或游離的能量，可從衝擊另一個電子、離子或原子而得

到。這種衝擊可分為彈性的和非彈性的兩種。在衝擊時，如果沒有激勵或游離產生，且質點的總運動能量和以前一樣時，這種衝擊稱為彈性的。衝擊質點的能量小於其第一個激勵階層所需的能量，就是這種衝擊的實例。如質點所載的能量比這個最小能量為大時，就稱為非彈性的衝擊，但激勵或游離的可能能量約不大於它的 0.2%，甚至比這個數值還要小。一個單位的快速電子在通過短距離的氣體時，能產生很多次衝擊，所以它有很多機會產出一個或一個以上的離子。

游離或激勵能量也可從電磁輻射或光中產生。

光子 在早年所有光學實驗的研究中，如對於光的繞射及干擾等，曾做過很多的觀察，從這種觀察中，可以明白地看出電磁輻射的電波結構。但最近則以原子反應來觀察光的性質，也可以明白的看出電磁輻射中一堆原始質點的行爲，這種質點就稱做光子。因為在某種情形下，光的性質好像很多質點的行爲，在另一種情形下，它又好像波，所以我們可以自由地選擇其最適當的觀念。

實驗指出，每一光子具有一定的能量，稱做量子。這種能量是和它的頻率有關，其方程為：

$$W = hf \text{ 焦耳,} \quad (1-1)$$

式中 W = 量子的能量；

h = 普郎克輻射常數 (6.6×10^{-34} 焦耳·秒)；

f = 輻射的頻率(週/秒)。

當光子以足夠的能量衝擊原子時，也能產生激勵或使一個電子產生游離。在衝擊後，光子將以比以前較少的能量，在新方向中前進，如方程 (1-1) 是正確的，則它的頻率已經減低。這個事實已由 X 射線加以仔細的證實。在其他情形下，光子用盡了它所有的能量而至消失，電子即受其多餘的動能。

原子通常都不能長久停留在它的激勵或游離狀態，它將立刻回到其低能量的正常狀態。在游離時，它將吸引任何方便的雜散電子，這種過程稱做重行結合。在激勵時，電子幾乎都將立刻回到它的正常軌道上。在任何這種過程中，即以光子的方式，發出其多出的能量。例

如，研究一個單位氫電子從其最低的激勵狀態回到其正常狀態的情形。按照圖 1-2 所指出的能量損失為 10.2 電子伏。一個電子的電荷為 1.6×10^{-19} 庫侖，因此，10.2 電子伏所代表的能量為：

$$W = 10.2(1.6 \times 10^{-19}) = 1.63 \times 10^{-18} \text{ 焦耳,}$$

將這個 W 值代入方程(1-1)，解出其頻率，即得：

$$f = \frac{(1.63 \times 10^{-18})}{(6.6 \times 10^{-34})} = 2.47 \times 10^{15} \text{ 週/秒.}$$

這個頻率是和紫外線氫氣光譜中波長為 1,216 埃的光線相對應。

1-2. 固體中的電子

欲使原子游離或從一個孤獨的原子中使電子移動，必須使用一定大小的能量，其情形如圖 1-2 所示。在氣體中，原子間相隔較遠，另一個氣體原子的存在，對於游離電位並沒有顯著的影響；但在固體中，原子間的距離較密，其外層軌道上的電子就會受到其鄰近原子的電場的影響；在金屬或其他少數固體中，其綜合電場的混淆，使最外層電子和核間的距離減小到可以從一個原子自由地走到另一個原子。

電導 有這種自由電子存在的物質，稱做導體；如在它的兩端外加一個電位差後，就可使自由電子流向正的一端，而產生電流。在大多數物質中，電子的流動速率是和其外加電壓成正比，這就是電路中一般所熟知的歐姆定律。電流流經導體上所生的熱能，就是流動電子和固體中原子衝擊或相互反應的結果。傳給原子的動能因而增加了它們的振動能量，使它的溫度上升。

存在的自由電子數量並不顯著的物質，稱做非導體或絕緣體。不過，如將這種物質加熱後，由於騷動的增加，給予外層電子足夠的能量，使它們能逃出其有力的界限，在外加電壓的影響下，即在物質中流動，這就是一般所知絕緣體在高溫時會變成良好的導體。在不良或半導體中，使它產生自由電子的能量，也可從感光而得到，例如硒的導電率隨着光的亮度而增加。這種情形可以解釋為光子給它若干能量，使它在物體中產生自由電子。有一種光電器械就應用這個原理而工作。

1-3. 電子放射

在某種情形下，自由電子能從導體的表面跑出，這種情形就稱做電子放射。這是很重要的，因為差不多所有的電子管都靠着電子放射面工作。

功函數 欲使電子從金屬中跑出，必須耗費一定大小的功。從性質的觀點來講，原子失去電子後，就留下一個正電荷，吸着這個被移動的電子。因為這個吸力反抗它的移動，所以必須有功做出。以電子伏來測定的功，即稱做物質的功函數。

普通物質的功函數，鉑約為 6 伏，鉍低至 1.8 伏。一種金屬和另一種金屬所構成的極薄的綜合表面，其功函數將更低。真空中塗有氧化物的陰極，就是這種例子。這種表面的功函數約為 1 伏。

熱放射 運動原理指出：所有固體的原子都以其平均位置作恆態的激動。在高溫度時，激動能量增加到可以將原子間的相互吸力抵消，使固體先經熔解，然後蒸發而成氣體。在導體中，自由電子也受到這種熱運動影響而繼續向四方流動。其中許多電子的速率很低，但有些因為它們相互間的連續衝擊，可能得到高的速率。其平均速率乃隨溫度面增加。

任何電子如具有走向表面的足夠速率，則電子將從導體的表面跑出。在正常溫度時，大於其功函數的運動能量的電子數目為零，但在 $1,000^{\circ}\text{K}$ 以上的溫度時，即可得到一個有用數值的放射。這種放射就稱做熱放射，因為電子從熱能中得到它的能量。在實用的電子管中，熱能是由電流通過電阻線面產生的。

電場放射 電場放射是指金屬表面的電子由於鄰近正電極的吸引而放射。這種吸力必須勝過其放射表面上本身電子間的正常親和力，在一個完全冷的金屬表面上，欲將其電子吸出，需要每公尺 10^8 伏的強大電場。在普通的低壓電子管中，電場放射是不會產生的，但在高壓的 X 射線管中，必須小心地設計，以避免這種不需要的電場放射。其法通常將電極隔開得遠些，並將其所有的尖角處磨圓。

二次放射 二次放射是由若干原始質點或另一電子的衝擊所得到的運動能量而生的電子放射。任何金屬表面被電子或離子衝擊後，即產生這種放射。高速率的原始質點打擊金屬表面後，即將它們的運動能量送給其貼鄰的一個或幾個電子，得到這種運動能量的電子，即從表面跑出。如以前一樣，低功函數的物質容易產生二次放射。這種過程是非常有效的，從一個特製表面上，一個單位原始電子能產生 10 個二次電子。正離子的效應比它低得多，其所生的二次電子比 1 單位還要少。

二次放射雖在有幾種真空管中很有用處，但一般說來它是有害的，應該設法阻止其產生。

光電放射 電子放射也可由光子衝擊一個金屬表面而產生。光子的投射會將它們的能量送給接近金屬表面的電子。若有足夠的能量，電子即放射出來。放射的可能性，可用愛因斯坦於 1905 年所發明的下列方程來表示：

$$\frac{mv^2}{2} \leq hf - W, \quad (1-2)$$

式中 $mv^2/2$ = 放射電子的最大動能，單位是焦耳；

hf = 從方程(1-1)計算出來的光子的投射能量，單位是焦耳；

W = 使電子跑出時所需的功，單位是焦耳。

從這個方程乃知：一個放射電子的可能最大運動能量是等於投射能量減去其跑出時所需的能量。或因內部的衝擊，或因速率不能針對其表面，大部份電子祇得到比其最大值為小的能量。但方程(1-2)指出，除非 hf 大於 W 時，就不能產生放射。所以普通金屬須有高頻率的光(如紫外光線)，才能產生放射，但具有低功函數的特製表面，則祇要有低頻率的可見光及紅外線的光即可。

至於放射電子的多少，則要看光子傳給電子的能量的能力而定；也就要看金屬表面的特性和光的頻率而定。在指定的光頻時，電流是和光的強度成正比。普通感光靈敏的表面，在 1,076.4 米-燭光的強度下，每平方公分能產生幾個微安的放射電流。

習題一

1-1. 在氫離子和電子重行結合產生正常的氫原子時，就會產生光，求這種光的頻率和波長。光的速率為 3×10^8 公尺/秒。

1-2. 汞氣譜中所尋出的最短波長為 1,188 埃，求汞氣的游離電位。

1-3. 求一個電子使汞氣游離的最小速率。電子的質量為 9.1×10^{-31} 公斤。

1-4. 從決定金屬功函數的的試驗中指出：紅光不能產生光電放射，但任何低於 4,500 埃頻率的藍光，都可以產生光電放射，問其表面的功函數為若干伏？

1-5. 將 4,000 埃至 8,000 埃範圍內所有波長中可以看見的光，照到一個功函數為 1 伏的光電放射性表面上。求任何放射電子所有的最大可能運動能量。

1-6. 一只靈敏的光電管，用 10-級電子倍增器來增加它的輸出電流。如在這種倍增器中，當極微小的光電放射電流指向一個標的時，每一個原電子能產生幾個二次電子。這種電子轉而向第二個標的加速前進，使電流再行增加，如此重複演出。在這個 10-級的倍增器中，這種情形有 10 次之多，它的最後輸出電流為其輸入的 200,000 倍。求二次放射對原電流在每一次衝擊中的比值。