

大學叢書

應用電子學

上 冊

沈慶垓編著

商務印書館出版

大學叢書
應用電子學

上 冊

沈慶堦編著

商務印書館出版

*(350714A)

大學叢書 應用電子學

上册

★版權所有★

編著者 沈 慶 垓

出版者 商務印書館

上海河南中路二一號

發行者 三聯 中華 商務 開明 聯合發行公司

中國圖書發行公司

北京觀線胡同六十六號

印刷者 商務印書館印刷廠

1952年12月初版

定價 18,000

北京造1—2,000

前 言

“應用電子學”這門課程因為缺乏適當的教本，使教學工作上發生很大的困難。因此，編者不自量力，將目前所用的講義，根據五年來的教學經驗加以一番整理和補充，作編寫教本的嘗試。

編寫時所遭遇的最大困難是內容的抉擇。“應用電子學”的內容沒有明確的界說。狹義地講，它專指電子管以內的理論；但廣義地講，也可以包括電子管線路。浙江大學電機系曾經在最近調查過國內各大學關於該課程的教學內容，結果是各校一一不同，與教育部高等學校課程草案所規定的出入很多。就浙江大學而言，這門課程的教學內容曾經多次的討論和修改，而以最近兩年來所採用的辦法比較滿意。我們的方法是這樣：修電訊的學生在三年級修習“應用電子學”兩學期，第一學期研習電子管以內的理論，第二學期把電子管線路的基本原理很簡單地全部讀過；然後到四年級修習“無線電原理”時再作進一步的研討。用這種方法等於把“無線電原理”延長為三學期，但比每學期教授三分之一的方法收效更佳。因為電子管線路各部分互有關連，例如：讀放大器時如果能够預先懂得一點振盪器的原理，便更容易了解。根據兩年來的經驗，這種重複的讀法並沒有浪費時間，反能使學生懂得更透澈。而且這樣讀法對於三年級暑期實習和四年級無線電實驗的安排也大有幫助。根據了這個事實，所以編者把電子管線路部分也搜集在本書範圍以內，以供擔任本課教員的

抉擇。第一章到第六章討論電子管的理論和實際，第七章到第十四章討論電子管線路的基本原理及應用。

本書內容的安排以基本原理為出發，以實際應用為依歸。對於比較高深的理論，編者試用淺顯的文字作概念的介紹，啓發初學者，作為進一步研究的基礎。例如：第二章中介紹了雜質半導體的淺近理論，利用它來解釋塗氧化物陰極的發射原理和光伏效應；第三章中介紹了保角變換的數學方法，用來研究真空管內的靜電場。電子管部分並沒有將超短波電子管列入，因為這方面的理論牽涉太廣，在尚未瞭解普通的線路原理以前，難以解釋超短波振盪現象。電子管線路部分以一般性的應用為對象，不以無線電通訊為限。偏重質的解釋，而忽略比較複雜的量的計算。凡是實用上比較少見的都略去不提，例如：放大器中只講狹帶而不講寬帶；調制器中只講調幅而不講調頻。無線電通訊只是電子管應用的一部分，關於這部分本書只敘述了一些基本原理，習電訊的學生可以在“無線電原理”一課中更求深造。對於工業上的應用和電子儀器部分作了比較詳細的介紹。在新中國建設蒸蒸日上的今日，這方面知識的需要勢必日益普遍。本書主要地固然是為了大學教本而編寫，同時也可以供一般使用電子管的人士參考之用。

本書中的單位採用合理化米鈎秒制，譯名大部分按照中國科學院最近編訂的“物理學名詞”。

編者學識淺陋，錯誤之處在所難免。若蒙高明指正，不勝感激。

承王懋鋆、毛振琮、程開甲諸先生校閱稿件，指正錯誤；並承龐紀彥同志繪製插圖，敬表謝忱。

沈慶堦

一九五二年春於杭州浙江大學

上 冊 目 錄

第一章 電子運動學和陰極射線管1

1.1 原子和電子 1.2 電子在靜電場中的運動 1.2.1 電場與電子初速平行 1.2.2 電場與電子初速垂直 1.3 質量與速度的關係 1.4 電子在磁場中的運動 1.5 電子在電場和磁場中的運動 1.5.1 電場與磁場平行 1.5.2 電場與磁場垂直 1.6 電子在不規則電場中的運動 1.7 陰極射線管 1.8 電子束的聚焦 1.8.1 靜電聚焦 1.8.2 磁聚焦 1.9 電子束的偏轉 1.9.1 靜電偏轉 1.9.2 磁偏轉 1.10 螢光屏 總結

第二章 電子發射35

2.1 能級和能帶 2.2 金屬中的電子 2.3 自由電子的速度 2.4 功函數 2.5 熱電子發射 2.5.1 李查生方程式 2.5.2 發射常數的測定 2.5.3 功率—發射圖 2.6 鎢絲 2.7 鈦鎢絲 2.8 塗氧化物陰極 2.9 塗氧化物陰極的理論 2.10 接觸電位 2.11 蕭特基效應 2.12 強電場發射 2.13 次級發射 2.14 光電發射 2.14.1 光電現象的發現 2.14.2 理論的解釋 2.14.3 光譜選擇性 2.14.4 光電管的構造和感光物質 2.14.5 真空光電管 2.14.6 含氣光電管 2.15 光伏效應 2.16 光導效應 總結

第三章 真空導電和真空管104

3.1 空間電荷作用 3.1.1 平行面兩極管 3.1.2 圓柱形兩極管 3.2 兩

極管特性曲線 3.3 真空管的定額 3.4 三極管中的靜電場 3.4.1 極間電位分佈 3.4.2 放大因數的計算 3.5 三極管特性曲線 3.6 真空管係數 3.7 四極管 3.8 五極管 3.9 束射管 3.9.1 構造和特性 3.9.2 簾柵極與板極間的空間電荷作用 3.10 其他多極管 總結

第四章 氣體導電152

4.1 氣體分子運動說 4.1.1 分子運動的速率 4.1.2 平均自由路程
4.2 激發和輻射 4.3 電離 4.4 亞穩狀態 4.5 消電離 4.6 湯生放電 4.7 崩潰 4.8 巴邢定律 4.9 電流與電壓的關係 4.10 輝光放電 4.11 弧光放電 總結

第五章 含氣管和放電燈186

5.1 輝光管 5.2 熱陰極含氣兩極管 5.3 汞弧整流管 5.4 引燃管 5.5 逆弧 5.6 閘流管 5.7 含氣管的定額 5.8 白熾燈和放電燈 5.9 氖燈 5.10 鈉汽燈 5.11 水銀燈 5.12 熒光燈 總結

第六章 真空系統和電子管製造..... 228

6.1 真空的產生 6.1.1 旋轉抽氣機 6.1.2 汞汽擴散抽氣機 6.1.3 油汽擴散抽氣機 6.2 真空的測定 6.2.1 麥克里奧真空計 6.2.2 皮拉尼真空計 6.2.3 熱電偶真空計 6.2.4 電離真空計 6.2.5 電花線圈 6.3 玻璃與金屬的封合 6.4 電子管的材料 6.4.1 玻璃 6.4.2 板極材料 6.4.3 柵極材料 6.4.4 陰極材料 6.4.5 絕緣體 6.4.6 引入線 6.4.7 收氣劑 6.5 電子管製造 6.5.1 另件製造 6.5.2 裝配 6.5.3 封口 6.5.4 抽氣 6.5.5 裝燈頭 6.5.6 激活 6.5.7 檢驗 總結

應用電子學

第一章 電子運動學和陰極射線管

“應用電子學”這一門學問，從字面上解釋，似乎是研究電子的應用的科學。假若果真如此，豈不將一切電機工程上的學問包羅俱盡？因此，這個名詞極不適當，可惜延用已久，成了習慣。實際上它的研究範圍祇是限於“真空或氣體中的導電現象”。爲了使電子運動的區域和四周的大氣隔離起見，我們往往用玻璃或其他不漏氣的物質將這個區域加以包圍，這樣造成的一種東西稱爲電子管 (electronic tubes)。如果把“電子學”改爲“電子管學”，也許更爲妥當。大部份電子管內的氣體抽得非常稀薄，管內氣壓通常在 10^{-6} 到 10^{-7} 毫米水銀柱，相當於 10^{-9} 到 10^{-10} 的大氣壓力。像這樣的低氣壓我們稱之爲真空 (vacuum)。但也有一部分電子管內封入少量的稀有氣體或金屬蒸汽。因此，電子管可以分爲兩大類，一類是真空管 (vacuum tubes)，另一類是含氣管 (gas tubes)，這兩類電子管的特性和應用各不相同。不過，單憑電子管還不能完成工作的任務，在應用時必須和線路相配合。因此，應用電子學的研究範圍有狹義的和廣義的兩種解釋：狹義的解釋只是限於電子管以內的問題，而廣義的解釋則除電

子管外還包括電子管線路。

電子管的應用到目前為止雖然以通訊為主，但其他各方面的應用正在方興未艾，層出不窮。舉例來說，振盪器可以用在發報機或廣播機上，藉以發射訊號或廣播消息；但也可以用在工業上使金屬加熱；或者用在雷達上藉以測定遠處目標的位置和距離；甚至於用在醫學上治療疾病。這種種振盪器的設計技術雖然一一不同，但它們的基本原理並無二致。近幾年來電子管在工業應用上的地位日漸重要。利用電子管作為控制工具，不論就準確性或靈敏度論，都大大地超過了機械控制，不但改進了出品的品質，並且節省了人力，使少數工人能够管制整個工廠，這在工業先進的蘇聯，已經有良好的先例。即使就我國而論，電子管的應用也已經深入羣衆，擴音機、日光燈、X光管等等在城市中都成為家喻戶曉的東西。因此，對於應用電子學的研究不再僅僅是電訊工程師的工作，而已經發展成為一種普遍的需要了。

本書將電子管和電子管線路的理論和實際作有系統的介紹，從基本原理出發，推演出各種電子管和電子管線路的性能，力求理論與實際的結合。編者希望通過本書能够使學者獲得關於電子管和電子管線路的基本知識，以為實際使用或進一步研究的準備。

研究如何利用電子運動之前，我們必須首先明瞭電子運動的規律。能够控制電子運動的不外乎電場和磁場。本章中我們將要研究各種不同的電場和磁場中電子運動的規律。至於電子的來源如何暫且不管，留待第二章中再說。分析了運動規律以後，我們將討論陰極射線管的構造和原理，作為解釋電子運動的舉例。至於陰極射線管的線路和應用將在第十四章中討論。但在開始研究電子運動之前，

且讓我們簡單地敘述一下原子的構造和電子的性質。

1.1 原子和電子

一切物質都是由原子所組成。根據波爾(Bohr)、羅塞福(Rutherford)的學說,原子的中心有一個原子核,它的周圍有若干的電子環繞着運行,正像行星繞着太陽旋轉一樣。原子核內含有質子和中子。質子的電荷與電子的電荷大小相等而性質不同,(凡是與電子電荷性質相同的稱為負電荷,與它不同的稱為正電荷。)而質子的質量是電子質量的 1850 倍。中子的質量與質子的一樣,但是並不帶電。因為質子和中子比電子重得很多,所以前兩者數量的和決定元素的原子量,而質子的數量決定原子核的電荷。因為整個原子的電荷呈中性,所以質子的數量必須與核外電子的數量相等,這個數量稱為原子序,通常大約等於原子量的一半。例如:氫的原子核含有一個質子,核外繞着一個電子,它的原子量是 1.008,原子序是 1。鈉的原子核含有十一個質子和十二個中子,核外繞着十一個電子,它的原子量是 22.997,原子序是 11。屬於同一元素的原子也有原子量不同的,這是由於中子數量不同的緣故。例如:氫的原子核中也有一個或二個中子的,這種“重氫”是氫的同位素。

根據精密的測定,電子的電荷是

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ 庫倫} \quad (1.1)$$

電荷與質量之比是

$$\frac{e}{m} = 1.759 \times 10^{11} \text{ 庫倫/仟克} \quad (1.2)$$

從(1.1)(1.2)兩式可以求得電子的質量是

$$m = 9.107 \times 10^{-31} \text{ 仟克} \quad (1.3)$$

電子的質量既然如此渺小，而電荷與質量之比却很大，因此，很容易用電場來控制它的運動，使它在瞬息之間從靜止加速到很高的速度（從下面 1.21 節中的計算可以看出）。電子管所以被廣泛應用的基本原因就在於此。

電子繞着原子核的運行限於一定的軌道。這種軌道集合成若干組，每一組稱之爲層，每一層標以一定的符號以便稱呼，從最接近原子核的內層起，依次稱爲： K, L, M, N, O, P, Q 等。每一層上所能容納的電子有一定的最高額，從最內層（ K 層）起，依次是：2, 8, 18, 32, 18, 18, 2。至於各層之間能量的關係，我們將在第二章和第四章中詳細討論。

最外層的電子數目決定元素的化學性質，這些電子稱爲價電子。倘若是八個的話，化學性質最不活潑，例如氦（它的各層電子數自內而外依次是 2, 8）；氬（各層電子數是 2, 8, 8）；氪（各層電子數是 2, 8, 18, 8）；和氙（各層電子數是 2, 8, 18, 18, 8）。這類“惰性氣體”不容易和金屬起作用，所以往往用在含氣管中。另外有一類元素它最外層的電子僅有一個或二個，這些最外層的電子很容易從電子脫離，例如鎢、汞等，這類物質可以用作電子管的陰極，藉以發射電子。

原子的構造既然如此複雜，但我們切勿誤會它的空間被這些構成物擠得水洩不通。根據理論的推斷和實驗的證明，原子核的直徑大約是 10^{-15} 米，電子的直徑也與這個數值相差不遠，而原子的直徑則平均在 10^{-10} 米左右，所以原子中間充滿着空隙。事實上被原子核和電子佔住的空間只有原子體積的 10^{-15} ，其餘的地方都是空着。

1.2 電子在靜電場中的運動

在下面各節的討論中,除非特別指明,我們一概假定所有的現象發生在高度真空中。這並不是說:空間絕對沒有空氣分子存在,而是指場內的空氣已經減少到如此稀薄,它的存在不至於影響電子的運動。

1.2.1 電場與電子初速平行 假設有一個電子在均勻的靜電場中運動,它的初速是 v_{ox} , 與電場強度 E_x 的方向平行,如圖 1.1 所示。用 m 和 e 分別表示電子的質量和電荷, x 表示位移, v_x 表示速度, a_x 表示加速度, t 表示時間。

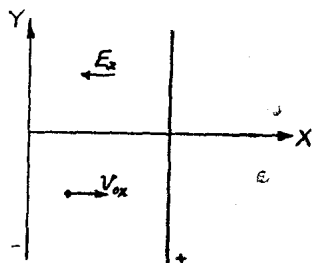


圖 1.1 與電子初速平行的
均勻電場。

這個電子在電場中受到力的作用,力的方向與 E_x 的方向相反,力的數值等於 E_x 與 e 的乘積。從牛頓第二定律,

$$e E_x = m a_x$$

所以

$$a_x = \frac{e E_x}{m} \quad (1.4)$$

所以,這個電子將沿電場強度的反方向作等加速運動。而

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v_{ox} + a_x t \\ x &= x_0 + v_{ox} t + \frac{1}{2} a_x t^2 \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

式(1.5)中 x_0 是電子出發時的位移。

電子在電場中受力的作用而加速,動能因而增加。它所獲得的動能應該等於電場對它所作的功。假設電子從某點 a 出發,初速是

零，到達另一點 b 時速率增高到 v ， a, b 兩點間的電位差是 V ，則

$$e \int_a^b E_x dx = eV = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}} \quad (1.6)$$

根據電位差的定義， V 是單位電荷在 a, b 兩點間的位能差，所以電子電荷與電位差的乘積也就等於電子從 a 點移動到 b 點時失去的位能。所以式(1.6)也可以從“能量不滅定律”推得，因此，這個結果並不限於均勻電場中。

若用 $V=1$ 伏特代入式(1.6)，可得

$$v = 5.93 \times 10^5 \text{ 米/秒}$$

從這個數值可以看出電子在電場中容易加速的程度。

電子經過一伏特電位差所獲得的動能是一個定值，這個數值可以從以上的關係求得，是

$$1.602 \times 10^{-19} \times 1 = 1.602 \times 10^{-19} \text{ 焦爾}$$

這個數值在電子學中往往採用作能量的單位，稱為電子伏特 (electron-volt)，所以

$$1 \text{ 電子伏特} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ 焦爾} \quad (1.7)$$

如果說，某能量是“4.52 電子伏特”，這就是說，式(1.6)中 V 的數值是 4.52，但若用“焦爾”表示，它的數值是 4.52 與電子電荷(1.602×10^{-19})的乘積：

$$4.52 \times 1.602 \times 10^{-19} = 7.25 \times 10^{-19} \text{ 焦爾}$$

1.2.2 電場與電子初速垂直 假設電子的初速與電場方向相垂

直,如圖(1.2)所示。電子初速是 v_{ox} , 沿 X 軸正方向,而電場強度是 E_y , 沿 Y 軸反方向。電子從原點出發, 沿 X 軸方向的速度不受外力影響, 因之將永遠不變。若用 v_x 和 x 分別表示 X 軸方向的速度和位移,則

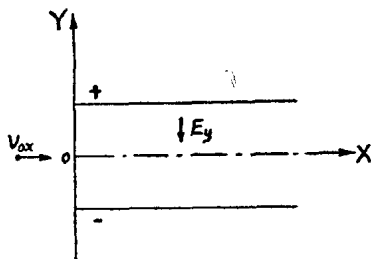


圖 1.2 與電子初速垂直的均勻電場。

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v_{ox} \\ x &= v_{ox} t \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

沿 Y 軸方向則將作等加速運動, 若用 v_y , a_y 和 y 分別表示 Y 軸方向的速度, 加速度和位移, 則

$$\left. \begin{aligned} v_y &= a_y t = \frac{e E_y}{m} t \\ y &= \frac{1}{2} a_y t^2 \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

從(1.8)、(1.9)兩式消去 t , 可得

$$y = \frac{1}{2} a_y \left(\frac{x}{v_{ox}} \right)^2 = \left(\frac{1}{2} \frac{a_y}{v_{ox}^2} \right) x^2 \quad (1.10)$$

從式(1.10)可知電子在電場中將沿拋物線的途徑而運動。

1.3 質量與速度的關係

在上面的演算中我們假定電子的質量並不因運動而起顯著的變化。這個假定在電子速率不高時可以成立, 但當電子速率超過十分之一光速時, 就會引起顯著的差誤。根據相對論的學說, 電子運動時質量隨着增加, 若用 m_0 表示電子的靜止質量, m 表示電子的運動質量, v 和 c 分別表示電子速率和光速, 其間的關係是

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (1.11)$$

若用 V 表示電子速率由零增加到 v 時所經過的電位差，則

$$m = m_0(1 + 1.965 \times 10^{-6} V) \quad (1.12)$$

從以上兩式可知：當電子速率達到光速的十分之一時質量大約增加千分之五，而所需的電位差大約是 2600 伏特。所以，在電位差超過 3000 伏特的情形下，電子質量需要加以校正。但在大部分電子管中所用電壓不至於如此之高，因速率而質量增加的影響往往略而不計。

1.4 電子在磁場中的運動

討論電子在磁場中的運動之前，必須求出電子在磁場中所受的力。假設有一長為 L 的導體，內部的電子沿某一定方向作等速運動，速度是 v ，電子密度是 n ，於是在一秒鐘內通過切面 A 的電子數等於以 A 為底， v 為高所作柱形內包含的電子數目 $n v A$ 。但每秒鐘內通過的電荷謂之電流，若用 I 表示電流， e 表示電子電荷，則

$$I = n v A e \quad \text{安培} \quad (1.13)$$

如果電流方向與磁場方向平行，這導體不會受力的作用。但若電流方向與磁場方向垂直，導體上便受到力的作用，力的方向可以用“左手規則”來決定——若將左手的拇指，食指和中指互相垂直，食指指向磁

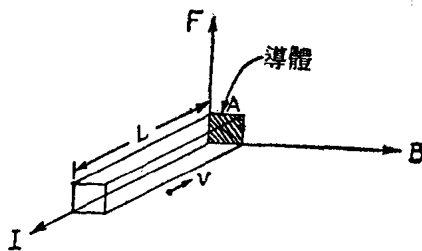


圖 1.3 電子在磁場中運動時所受的力。

通方向,中指指向電流方向(電流的方向與電子運動的方向相反),那末,拇指便指向電子或帶電導體所受的力的方向,如圖 1.3 所示。若用 B 表示磁通密度, F 表示導體所受的力,則

$$F = B I L = B n v A e L \quad \text{牛頓} \quad (1.14)$$

上式中 B 的單位是“韋伯/平方米”, L 的單位是“米”, A 的單位是“平方米”, v 的單位是“米/秒”, n 的單位是“電子數/立方米”,而 e 的單位是“庫倫”。但 $n A L$ = 導體內電子總數,所以每個電子所受的力是

$$f = B e v \quad \text{牛頓} \quad (1.15)$$

求得了電子在磁場中運動時所受的力以後,讓我們來討論電子在磁場中運動的規律。如果電子初速與磁場方向平行,則不會受力的作用,我們無須討論,現在只需討論電子初速與磁場方向垂直的情形。

假設有一個電子從左方進入一均勻磁場,如圖 1.4 所示,電子初速是 v_0 ,磁通密度是 B ,它的方向與 v_0 相垂直。則根據式(1.15),這電子所受的力等於 $B e v_0$,力的方向與 v_0 及 B 的方向都相垂直。因此,這電子將沿圓周而運動,在磁場中所受的力恰巧供給圓運動的向心力。若用 R 表示圓周半徑, m 表示電子質量,則

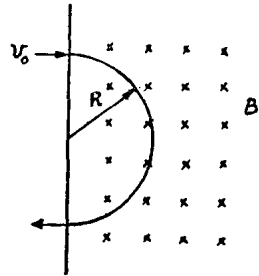


圖 1.4 電子在與初速垂直的磁場中作圓運動。

$$B e v_0 = \frac{m v_0^2}{R}$$

所以

$$R = \frac{m v_0}{e B} \quad \text{米} \quad (1.16)$$

角速度是

$$\omega = \frac{v_0}{R} = \frac{e B}{m} \quad \text{弧度/秒} \quad (1.17)$$

週期是

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{e B} = \frac{35.5}{B} \times 10^{-12} \quad \text{秒} \quad (1.18)$$

從(1.16)、(1.18)兩式可知：電子路徑的半徑與電子速率成正比，但不論電子速率高低如何，旋轉一周所需的時間都是一樣。

在以上的情形中，因為力的方向垂直於電子運動的方向，所以電子速度的大小不受影響，受到影響的祇是速度的方向，結果電子的動能保持不變，這現象和靜電場裏發生的恰成對照。

如果電子初速既不與磁場方向平行，又不垂直，而是與磁場方向成傾斜的角度，那末，我們可以把電子初速分解為兩個成份，一個與磁場方向平行，另外一個與磁場方向垂直，前者不受力的影響將保持不變，而後者與磁場作用的結果產生圓運動。於是，電子一面打滾，一面前進，運動的路線變成一個螺旋線形，螺旋的旋距永遠保持不變。

1.5 電子在電場和磁場中的運動

1.5.1 電場與磁場平行 假設電場和磁場同時存在，而且互相平行，如圖 1.5 所示，兩者可能是同方向，也可能是反方向。圖(1.5)中假定電場強度 E 的方向是沿 Y 軸的正方向，而磁通密度 B 的方向是沿 Y

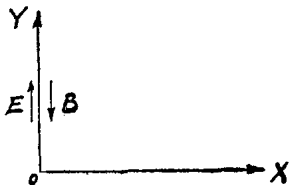


圖1.5 互相平行的電場和磁場。