

電子裝置及 電路理論

上冊

electronic
devices
and circuit
theory

謝芳生博士譯

BOYLESTAD
NASHELSKY

second
edition



24698

電子裝置及 電路理論

第二版
(1978)

著 者

Robert Boylestad

Louis Nashelsky

譯 者

謝芳生博士

東華書局印行



版權所有・翻印必究

中華民國六十七年 八 月初版

中華民國六十九年 三 月四版

大專
用書 **電子裝置及電路理論(全二冊)**

上册 定價 新台幣一百二十元整

(外埠酌加運費滙費)

原 著 者 *Robert Boylestad & Louis Nashelsky*

譯 者 胡 芳 生

發行人 卓 鑫 森

出版者 臺灣東華書局股份有限公司
臺北市博愛路一〇五號
電話：3819470 郵撥：6481

印刷者 合 興 印 刷 廠
臺北市大理街130巷2弄1號

行政院新聞局登記證 局版臺業字第零柒貳伍號
(6 7 0 2 6)

前 言

這本書原則是爲了基本電子學方面二個學期或三個學期的課程寫的。* 我們希望讀者至少已修過一門直流電路分析，同時已修過或正在修交流電路分析。研讀本書所需要的數學程度和交流電路分析中所需要的差不多。

爲了幫助讀者瞭解起見，本書中含有許多例題，強調每章中重要的各點。同時說明及示範也很多，以便幫助讀者學習書中介紹的各項新觀念及方法。重要結論都是用帶方框的數學式或黑體字答案來表示的，以便提醒讀者注意重點。

這本書是我們二人集多年之實際教學心得所寫的一本二學期電子課程。不過，這十五章中所涉及的教材實際上遠超過爲期各 15 週的二個學期（或爲期 10 週的三個學期）所能教完的。這篇前言將提供一些作者認爲這些題材應當如何組織的一點意見。

爲了將部分教材更新，這第二版的發行是必要的。大部分修訂內容都出現在前七章裡，不過每一章的基本內容仍保持不變。分析方法已經改進，以便提供清晰和更有意義的發展。對常用的新裝置方面，也增編或擴充了教材的內容，使本書更切合實用。

原則上，前六章講的是電子裝置的基本知識——包括構造、偏壓、以及作爲單級時的操作。這些題材可以放在第一學期中教，授課老師可以選擇某些重點予以加強或略掉某些部分。這門課開始時將介紹二端裝置的理論與操作，而將重點放在半導體二極體上。因爲一般理論課程總是和另一門實驗一起教授的，所以在取材時我們以實際電路爲例題以便能在實驗室中實作。新增的題材計有發光二極體（light emitting diode, LED）、液晶顯示（liquid crystal display, LCD）、以及太陽能電池（solar

* 譯者註：美國有些大學近年將一學年劃分爲三個學期，稱爲 trimester。

cell)。

第二章是關於二極體整流器及濾波器的，其中提供了一些二極體在電源方面實際應用的例子。別的教本通常將這部分材料放在最後。作者本身的經驗發現，利用這種實際題材可以將有關裝置的基本理論的各章連貫起來，同時在實驗室中也可提供一些有價值的實驗。有關電容濾波器的題材都已修改過了，並且把不常用的濾波電路予以刪減。

第三章講的是雙載子接面電晶體裝置 (BJT transistor device)，它的構造，以及操作理論。前面已經說過了，教完第一章後接着講這一章也是可以的。電晶體的操作是同時以圖解法與數學分析法提出的。書中說明並示範了電晶體的放大作用。在這課程的起始部分我們引用實際的電流方向，根據教學經驗，這樣會使學生對基本觀念更容易瞭解。

以作者們的教書經驗說：若在開始時將雙載子接面電晶體的直流偏壓與交流操作分開來討論，會使讀者們對雙載子接面電晶體的作用易於瞭解得多。所以第四章中就專講雙載子接面電晶體（及真空管）的直流偏壓。其中包括了共射、共基、以及共集（射極隨耦器）各種組態的各式偏壓電路在內。我們用許多例題來協助說明書中提出的理論。同時並包括了一些設計問題在內，因此這項討論就比較完整。

第五章是基本電子學方面最重要的一章，所以不論在怎樣的一門課中都應當給予足夠的時間來講授。我們先詳細討論電晶體交流等效電路的導法，然後是對於整個小訊號電路的交流操作的分析。這章的討論（和第四章一樣）多半是數學方面的。不過我們盡量地令數學部分簡短直接，並採用很多例題，以便讀者能跟上這些觀念。我們先提出電晶體的混合等效路，然後在分析時再由工程方面的觀點來予以簡化，這樣可以比較切實些。接着介紹簡化的電路模型，這樣在分析雙載子接面電晶體電路時會提高學習興趣。

可能的話，關於場效電晶體的題材也應當放在電子學的第一學期中。在講過了雙載子接面電晶體（與真空管）的直流偏壓與交流分析之後，第六章所談的是許多實用的場效電路。我們也曾想過將場效電晶體的直流偏壓放在第四章中，而將它的交流分析包括在第五章內。不過根據授課的經

驗，我們覺得這樣做的話在每個題材上會化費太多時間，同時學生們會將場效電晶體當作一種次要的裝置來看待。將場效電晶體單獨列為一章足以強調它的重要性，同時也可以正確地說明它的操作。本章內容會經過大幅度修訂，以便將圖解法容納進去，使學生能直接利用圖解法為任何場效體求出直流電壓階。

第七章可以作為第二學期的起始，講的是多級的雙載子接面電晶體和場效電路。各級的負荷、整體增益的計算、以及分貝的用法都在這重要的一章中講了。若干例題被用來幫助強調其中主要各點。對多級放大器逐漸加強近似分析法的使用。有關頻率的教材全部修訂過了，以便更加明晰。

第八章講的是一些基本的功率放大電路中的強力電晶體的操作。最重要的是推挽式電路。其中談到了用變壓器及不用變壓器的電晶體推挽電路。此外，有關近似互補的推挽放大器和B類放大器的功率與效率也都談到了。

第九章總攬各項PNPN四層裝置——包括它們的構造、操作、以及電路的應用。這章可以很快地講過去，甚至不講，都不會影響課程的連貫性。在這第二版裡，我們將新式的V形場效體（V-FET）以及它的較高功率的能力也都在本章裡介紹了。

第十章是積體電路的製作與構造的簡介，原則上可以指定學生自己研讀。

第十一章談到二個很重要的課題，應被當作第二學期教材中相當重要的一部分。由於線性積體電路的用途日益擴增，差額放大器與運算放大器現在都已被視為基本單元了。所以這章中對每個題材都予以詳細的闡述並舉例題及其實際應用。

關於反饋放大器以及振盪器的第十二章在第二學期內至少要講一部分。這部分教材也可以延遲到第三學期的通信電子課程內講授。這章東西很多，時間不夠的話不必全部講到。

關於數位電路的第十三章提到了各種重要的數位電路，是相當完整的一篇簡介。在今日的電子界，這一題材是如此之重要，讀者必須對它很熟悉才行。如果貴校的課程表中沒有一門專談計算機電路與邏輯課程的話，那末這章中的教材就必須詳細地教完。

第十四章中講的是電壓調節器，其它各種電路是供讀者自己閱讀用的，以便提高他的興趣。

第十五章可以放在第二學期中的任何地方。雖然這一部分教材可以不在課堂上講授，但是它對學生來說卻十分重要，並且它可用來補充陰極射線示波器原理和應用方面的實驗工作。這章中強調的是該儀器的基本操作與用法。這裡又用了許多例題來加強重點。陰極射線示波器的操作與測量是十分重要的，所以它雖然被寫在書末，我們極其希望這些題材能在課堂上詳細講授。

幾乎每章中都有實用的例題，以便使這本書更適宜於作為教本。各章後面的習題用到的觀念是有關各節中最主要的各點。

我們要謝謝 Queensborough 社區學院電機系的 Aidala 與 Katz 二位教授，多年來他倆不斷地予我們以協助與鼓勵。他們為我們提供了教與學最佳的環境與道路。我們還要謝謝電機系的兩位秘書，Doris Topel 女士和 Helene Rosenberg 女士，她們對這修訂版的準備工作提供不少協助。最後，我們二人還要為這番有價值且十分愉快的合作而互致謝忱。

ROBERT BOYLESTAD
LOUIS NASHELSKY

Bayside, N.Y.

電子裝置及電路理論 (上)

目 次

第一章 二端裝置.....	1
§ 1-1 引 論	1
§ 1-2 理想的二極體	2
§ 1-3 真空二極管	5
§ 1-4 半導體二極體	10
§ 1-5 半導體二極體的製作.....	24
§ 1-6 負荷線和靜態條件.....	33
§ 1-7 靜電阻	36
§ 1-8 動電阻	37
§ 1-9 平均交流電阻	41
§ 1-10 等效電路	43
§ 1-11 截波器與定位器	51
§ 1-12 齊納二極體	59
§ 1-13 透納二極體	67
§ 1-14 強力二極體	70
§ 1-15 變容二極體	71
§ 1-16 光電管肖特基能障 (熱載子) 二極體	73
§ 1-17 光電管	76
§ 1-18 半導體的光電導體以及光電二極體	80
§ 1-19 發光二極體	83
§ 1-20 液晶顯示	86

§ 1-21 太陽能電池	90
§ 1-22 熱電阻	94
習題	96

第二章 二極整流器和濾波器 104

§ 2-1 二極整流	104
§ 2-2 全波整流	107
§ 2-3 一般濾波器的考慮	112
§ 2-4 單電容濾波器	116
§ 2-5 RC 濾波器	131
§ 2-6 π 型濾波器	140
§ 2-7 L 型濾波器 (抗流圈濾波器)	146
§ 2-8 電壓倍增電路	147
習題	151

第三章 電晶體與真空管 155

§ 3-1 引 論	155
§ 3-2 電晶體的構造	156
§ 3-3 電晶體的操作	157
§ 3-4 電晶體的放大作用	160
§ 3-5 共基組態	161
§ 3-6 共射組態	165
§ 3-7 共集組態	173
§ 3-8 電晶體的偏壓法	174
§ 3-9 電晶體的最高額定	176
§ 3-10 電晶體的製作	180
§ 3-11 電晶體的外殼與接端的鑑別法	183
§ 3-12 電晶體的試驗	184
§ 3-13 三極管	186

§ 3-14	五極管	192
	習題	195
第四章	直流偏壓	198
§ 4-1	引 論	198
§ 4-2	操作點	199
§ 4-3	共基 (C B) 偏壓電路	202
§ 4-4	共射 (C E) 電路的接法——一般偏壓問題	206
§ 4-5	偏壓固定的電路的偏壓問題	208
§ 4-6	偏壓固定的電路中偏壓點的計算	210
§ 4-7	偏壓穩定法	213
§ 4-8	有射極電阻的直流偏壓電路	220
§ 4-9	與貝他無關的直流偏壓電路	223
§ 4-10	電壓反饋電路中直流偏壓的計算	227
§ 4-11	共集極 (射極隨耦器) 的直流偏壓電路	231
§ 4-12	直流偏壓的圖解分析法	234
§ 4-13	真空管電路的直流偏壓管	241
§ 4-14	直流偏壓電路的設計	247
§ 4-15	其他各種偏壓電路	254
	習題	258
第五章	小訊號的分析	263
§ 5-1	引 論	263
§ 5-2	電晶體的混合等效電路	266
§ 5-3	各個 h 參數的圖解決定法	270
§ 5-4	電晶體參數的變化	276
§ 5-5	利用混合等效路所作基本電晶體放大器的小訊號分析	279
§ 5-6	在應用混合等效路及其有關方程式時常用到的一些近似關係	292

§ 5-7	近似的基極、集極、和射極等效路	308
§ 5-8	另一種方法	320
§ 5-9	集極反饋	337
§ 5-10	簡明表	344
§ 5-11	三極管的小訊號等效路	344
§ 5-12	三極管參數的變化	353
§ 5-13	五極管的小訊號等效路	354
習題		356
第六章	場效電晶體	366
§ 6-1	場效電晶體概論	366
§ 6-2	接面場效體的結構與特性	367
§ 6-3	接面場效體的直流偏壓	372
§ 6-4	金氧半場效體的結構與特性	380
§ 6-5	金氧半場效體的直流偏壓電路	386
§ 6-6	利用全能接面場效體偏壓曲線作直流偏壓	389
§ 6-7	交流小訊號放大器的操作	393
§ 6-8	高頻及低頻在場效體中的影響	404
§ 6-9	靴帶式源極隨耦電路	408
§ 6-10	場效體放大電路的設計	411
§ 6-11	場效體作爲一個壓變電阻器用	415
習題		418
附錄A	混合參數的變換方程式	421
附錄B	漣波因數與電壓的計算	423
附錄C	圖表	432
附錄D	部份單數習題答案	435

第一章

二端裝置

§1.1 引 論

這一章主要是用來介紹一種非常重要的二端裝置，它稱為二極體(管) (diode)。二極體(管)是今天所用的廣泛的各類電子電路的基本建造單元。在整流器、倍增器、限制器、定位器、截波器、調變器和解調器、波形形成電路、以及頻率變換器等代表性電路的操作方面它都是很重要的。現成的二極體(管)有許多不同的大小與形狀，同時操作的模式也不一樣。真空二極管(vacuum diode)及半導體二極體(semiconductor diode)均將在這章中談到。在最後各節中將包括齊納(Zener)、變容(varicap)、透納(tunnel)、光電(photoelectric)、矽製強力(silicon power)以及肖特基(Schottky)等等二極體的簡略說明。同時還要談到的是一種對溫度敏感的電阻器，稱為熱阻器(thermistor)，各種型式的目視顯示，例如發光二極體(LED)、液晶顯示(LCD)、以及太陽能電池(solar cell)，由於對能源的考慮，我們對後者重新發生了興趣。

第一個二極管被稱為弗來明管(Fleming's valve)，是弗來明氏(Ambrose Fleming)在1902年發明的。它的基本構造包括二個元件：在抽成真空的玻璃管內的一條燈絲及一個金屬片，和現代的高真空二極管有許多地方很像。一直到了1930年代的早期才有另一種非常不同的二極體問世而且日形重要，這就是半導體二極體。這一種固態裝置比真空二極管要小得多，同時特性方面也與理想的交換特性(switching characteristic)接近得多，它導致了貝爾實驗室的巴定(J. Bardeen)和勃拉登(W. Brattain)在1948年對電晶體放大器(第三章內要研究的三端裝置)的發明。

近年來發展的重點幾乎完全放在半導體二極體方面。除了在極高的頻

率或功率甚高及特殊用途（譬如光電裝置）方面以外，固態二極體幾乎有將真空二極管完全取代之勢。

在考慮真空二極管及半導體二極體操作的基本理論之前，先要介紹理想的（ideal）二極體以便明瞭二極體（管）的基本作用，同時為以後實際的二極體的特性建立一個比較的基礎。這裡使用“理想”一詞，表示這種二極體的特性正是我們工業技術上努力追求的那些特性。

§ 1.2 理想的二極體

理想的二極體是一種二端（two-terminal）裝置，它具有圖 1.1 a 及 b 中所示的符號及特性線。

在下面對於各元件的說明中，各個字母符號（letter symbol）、電壓極性（voltage polarity）、以及電流方向（current direction）必需加以規定，而這一點是極其重要的。如果所加電壓的極性是與圖 1.1a 所示相符的，被考慮的那段特性曲線就是在圖 1.1b 中垂直軸右邊的那部分。如果加的是一個相反的電壓，所談的就是左邊那一段。如果經過二極體的電流的方向是如圖 1.1a 中所示的，被考慮的那部分特性曲線就是在水平軸以上的；而方向相反時就要用到此軸以下的特性曲線。對於本書中將出現的大部分裝置特性而言，縱軸都將是電流軸，橫軸都將是電壓軸。

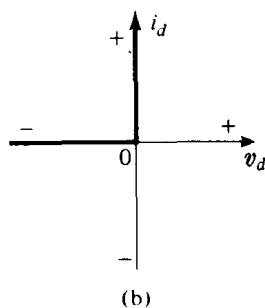
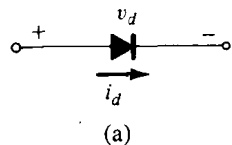


圖 1.1 理想的二極體：
(a) 符號；(b) 特性線。

二極體的重要參數之一是操作點（或操作區）的電阻。如果我們考慮那個由圖 1.1a 中 i_d 的方向及 v_d 的極性來規定的那區的話（圖 1.1b 中的右上象限），我們將發現由歐姆定律規定的順向電阻值 R_f 是

$$I_f - \frac{V_f}{I_f} = \frac{0}{2,3 \text{ 毫安}, \dots, \text{或任何正值}} = 0 \text{ 歐姆}$$

其中 V_f 是跨於二極體上的順向電壓， I_f 是通過二極體的順向電流。所以，理想的二極體在順向傳導區內是個短路 ($i_f \neq 0$)。

如果我們現在考慮 1.1b 中電壓是負的那區 (第三象限)，

$$R_r = \frac{V_r}{I_r} = \frac{-5, -20, \text{或任何反偏電壓}}{0} \\ = \text{極大的數目, 就我們的目的而言將被當作無限大 } (\infty)$$

其中 V_r 是跨於二極體上的反向電壓， I_r 是二極體中的反向電流。所以，理想的二極體在不傳導區內是一個斷路 ($i_d = 0$)。

重新檢討一下，圖 1.2 中所畫的情況都是確實的。

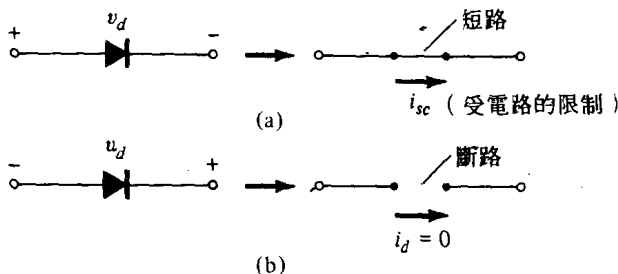


圖1.2 理想二極體的(a)傳導狀態和(b)不傳導狀態是由外加偏壓決定的。

一般而言，只要注意電流 i_d 的方向就能簡單地決定一個二極體是在傳導區或不傳導區內。就習慣用的電流方向而言 (與電子流的相反)，如果合成的二極體電流和二極體符號中的箭頭方向相同的話，這二極體就在傳導區內操作。上述情形已畫在圖 1.3 中。

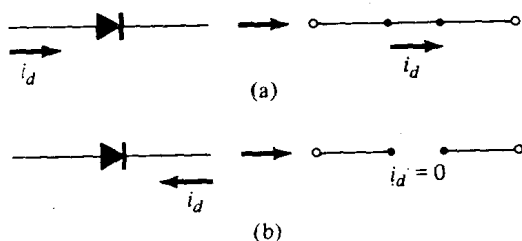


圖1.3 理想二極體的(a)傳導狀態和(b)不傳導狀態是由外接網路的電流方向決定的。

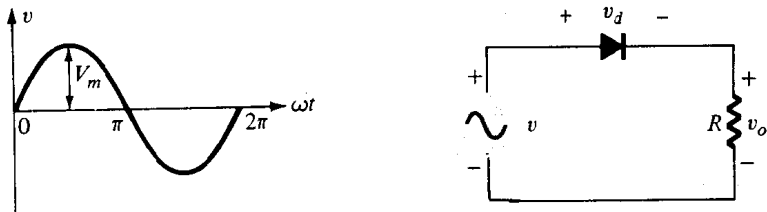
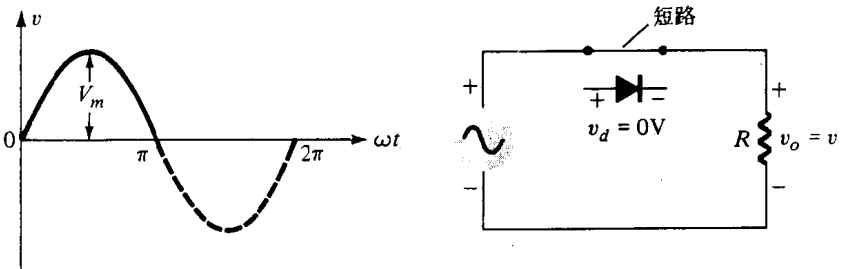
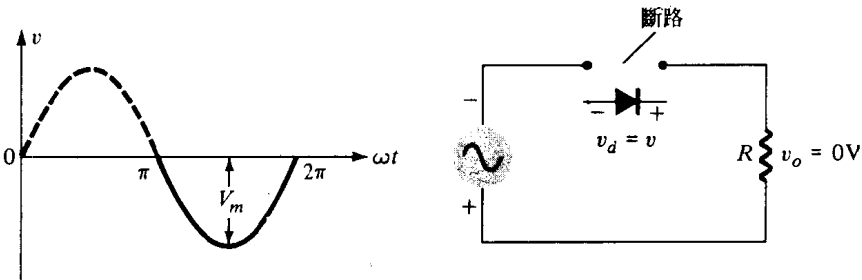


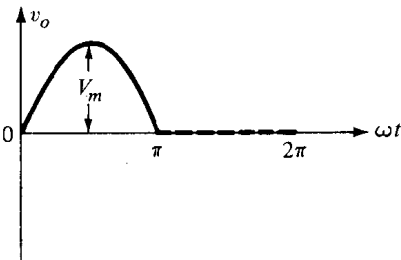
圖1.4 基本的整流電路。



(a)



(b)



(c)

圖1.5 圖 1.4 中電路的整流作用。

作為二極體（管）的一項實際應用的例子而言，讓我們考慮整流這過程，藉着它，一個平均值是零的交流電壓能被變成一個直流或平均值大於零的電壓。所需電路被劃在圖 1.4 中，它用了一個理想的二極體。

弦式輸入電壓 v 在 $0 \rightarrow \pi$ 這區域內，跨於二極體上位降的極性將會讓我們得出短路的代表法來，這電路就如圖 1.5a 所表示的。對於 $\pi \rightarrow 2\pi$ 這區而言，斷路表示法將能適用，電路就如圖 1.5b 所示的。

為未來的參考起見請注意各電路內輸入 v 的極性。對弦式輸入而言所示極性將是圖 1.4 中所示弦式波形的正的部分。

就圖 1.5a 所示情形而言，只要二極體是順偏的，所顯現的輸出電壓 v_o 就會和輸入電壓 v_i 完全一樣。在圖 1.5b 中，由於理想二極體的斷路表示法，在外加電壓 v 從 π 到 2π 之間輸出電壓 v_o 等於零。整個弦式輸入下的全部輸出波形見圖 1.5c。對於輸入電壓的每一週而言， v_o 的波形會自行重複以便每個波形具有同樣的頻率。仔細查看各個圖形就會發現外加的電動勢 v 和 v_o 是同相的；即是說每一個的正脈衝在同一時期內出現。當我們談到電晶體和真空管放大器時相角的關係將會愈形重要。

§ 1.3 真空二極管

基本的真空二極管包括一個陰極（cathode）和一個陽極（anode，金屬屏極），它們被放在一個抽空了的管子中，相對位置是如圖 1.6 所示的。陰極可以直接地或間接地被加熱。各種不同的陰極被畫在圖 1.7 中。

加熱了的陰極能為陰極與屏極間的區域提供大量的“自由”電子。加熱的方法是在加熱燈絲的二端上加一

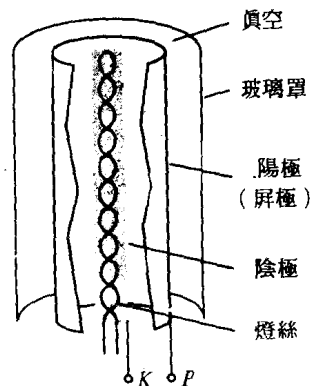


圖 1.6 真空二極管的基本構造。

個規定的電壓以便將陰極提高到能放出電子的溫度。這項外加的電壓會在燈絲中產生一項電流而形成 I^2R 的熱損失，正如烤麵包機中的加熱元件一樣。當燈絲的溫度升高時，電子的熱騷動 (thermal agitation) 會增加到一個程度，這時使得這些電子具有夠多的動能以便離開陰極表面而取得它們的“自由”狀態。這種發射被稱為熱離子 (thermionic) 發射。管子被抽空以防陰極由於空氣中的氧而被“燒掉”，同時也為了提高電子的移動率。

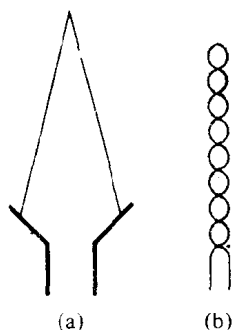


圖 1.7 陰極：(a) 直接加熱的；(b) 間接加熱的。

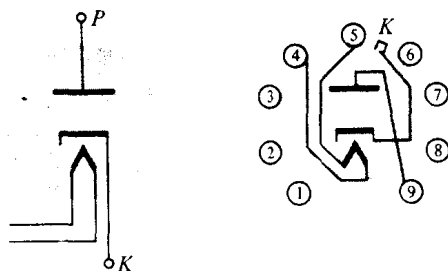


圖 1.8 間接加熱的真空二極管的符號及腳的接法。

在直接加熱的陰極中（燈絲就是陰極，如圖 1.7a 所示），電子是直接從燈絲材料放出來的。在間接加熱的情形下（如圖 1.7b 所示），電子是從一個不與燈絲直接相聯的表面放出來的。在這二種之間，間接加熱的用得較為普遍。如果將一個 60 週的交流電壓加到直接加熱的陰極上，由熱離子方式所產生的“自由”電子的數目在每一時刻都會不同，因為通過燈絲的電流是由外加電壓的瞬時值來決定的。電子的變化式發射會在系統的輸出處引起一個 60 週的交流聲。在間接加熱的情形下這種不良效應小到可以被略去不計。間接加熱的陰極的另一優點是：整個陰極是在一較為固定的電位下而直接加熱的那種沿着燈絲每點的電位都會不同。

間接加熱的真空二極管的圖形符號見圖 1.8。在管子上並沒有特別標明那一隻腳接到屏極、陰極、或燈絲上。我們必須參考真空管手冊才能