

五年制工業專科學校教科書

電子電路

原著者 Andrew R. Cohen

編譯者 黎 昌 誠

著作人 國立編譯館

補助機關 國家科學委員會



正中書局印行

版權所有



翻印必究

中華民國六十年九月臺初版

當代教
教科書
五年制工業專科學校 電子電路

全一冊 基本定價 二元四角

(外埠附加運費運費)

著 者 Andrew R. Cohen

編 譯 者 黎 呂 誠

著 作 人 國 立 編 譯 館

補助機關 國家科學委員會

發 行 人 李 潔

發行印刷 正 中 書 局

(臺灣臺北市衡陽路二十號)

暫遷台北市南昌路一段十二號

海外總經銷 集成圖書公司

(香港九龍亞答街一號)

海 風 書 店

(日本東京都千代田區神田保町一丁目五六番地)

內政部登記證 內版事業字第〇六七八號(6600) 滙

緒 言

大學工藝大綱叢書之編印，係根據工程學上之一種信念，該信念認為：基本理論之闡釋，以問題及其逐步解法作為證明，則收效將會最宏。

本書範圍，包括已予正式承認之理論及研究成果。所研討之題材，則涵納最新及習常之觀念方法、及名詞，並透過基本原理之引用，而將其發展出來。書中所列舉之由淺入深之問題、及其解答，係用於加強題材、作為例證、及示範分析方法。書中所討論之每一問題，均係由各書作者，不論其為一經驗豐富之教師，或為一擔任實際工作之工程師，根據其教學經驗，並力求變化所創始出來之精心佳作。而每冊大學工藝大綱叢書，亦係依據數所具有代表性之工程學院，所定之課業順序、所開之課程、及所採用之標準教科書而編訂。

在本書：「電子電路分析大綱」中，係以電子裝置之作為電路元件為其研討之重點，而略電子裝置工作之物理學（physics of operation）部份；即電子裝置在電路網絡中如何作用。為強調基本原理，及避免麻煩之數學運算，本書中所列舉之各個問題及其解答，在可能範圍內，均係以文字或非數字方式討論之。

大學工藝大綱叢書，除可作為大學教科書、或補充教材而外，對於工程師、或其他有關之從業人員，亦有其實用價值。

本書所用符號

A	放大器之放大倍數	h_{11}	輸入電阻
A_{fd}	反饋放大器之放大倍數	h_{12}	反向電壓轉換比值
A_i	放大器之電流放大倍數	h_{21}	前向電流轉換比值
A_v	放大器之電壓放大倍數	h_{22}	輸出電導率
a	變壓器之圈數比值	I	恒值電流
C	電容量	I_b	恒值或平均屏極電流
C_c	收極接合點電容量	I_b	恒值或平均座極電流
C_{gk}	柵極至陰極間極間電容量	I_c	恒值或平均收極電流
C_{gp}	柵極至屏極間極間電容量	I_c	恒值或平均柵極電流
$C_{g,p}$	一號柵極至屏極間極間電容量	I_{c2}	恒值或平均第二號柵極電流
C_{in}	輸入電極間電容量	I_e	恒值或平均射極電流
C_{out}	輸出電極間電容量	i	電流
C_{pk}	屏極至陰極間電容量	i_b	屏極電流
E	恒值電壓	i_b	座極電流
E_b	恒值或平均屏極電壓	i_c	柵極電流
E_{bb}	屏極電源電壓	i_c	收極電流
E_c	恒值或平均柵極電壓	i_{c2}	第二號柵極電流
E_{cc}	柵極電源電壓	i_e	射極電流
E_{c1}	恒值或平均第一號柵極電壓	j	$\sqrt{-1}$
E_{c2}	恒值或平均第二號柵極電壓	k	常數
e	電壓	L	電感量
e_b	屏極電壓	L_m	變壓器磁化電感量
e_c	柵極電壓	L_p	變壓器之初級電感量
ec_1	第一號柵極電壓	L_s	變壓器之次級電感量
ec_2	第二號柵極電壓	M	互感量
e_o	輸出電壓	N	變壓器線圈之圈數
f	頻率	P	平均功率
G	電導率	Q	績效數值 (Figure of Merit)
g_m	互導率	R	電阻值

R_p	變壓器之初級電阻	X	電抗
R_s	變壓器之次級電阻	Y	電納
r_b	座極電阻	Y_{11}	輸入電納
r_c	收極電阻	Y_{12}	轉換電納
r_e	射極電阻	Y_{21}	轉換電納
r_f	屏極電阻	Y_{22}	輸出電納
s	複素數頻率	Z	阻抗
t	時間	Z_{11}	輸入阻抗
V	恒值電壓	Z_{12}	轉換阻抗
V_{be}	恒值或平均座極對射極電壓	Z_{21}	轉換阻抗
V_{cb}	恒值或平均收極對座極電壓	Z_{22}	輸出阻抗
V_{cc}	收極電源電壓	α	公用座極電路短路電流放大倍數
V_{ce}	恒值或平均收極對射極電壓	γ	公用射極電路短路電流放大倍數
V_{eb}	恒值或平均射極對座極電壓	β	紋波百分比值
V_{ee}	射極電源電壓	θ	阻抗角
v	電壓	μ	三極管之放大因數
v_{be}	座極對射極電壓	π	3.14159
v_{cb}	收極對座極電壓	ω	角頻率
v_{ce}	收極對射極電壓	Ω	歐姆

目 次

緒 言	1
本書所用符號	1
第 一 章 電子裝置與固態裝置	1
1—1 前 言	1
1—2 兩接線點裝置：二極管	1
1—3 三接線點裝置：三極管及電晶體	3
1—4 多電極式裝置及氣體管	7
1—5 直線性及非直線性裝置	11
第 二 章 特性曲線圖之用法	13
2—1 前 言	13
2—2 負荷線及直流工作點	13
2—3 偏電壓及直流工作點	16
2—4 動態工作：交流負荷線	28
2—5 工作類別	39
2—6 直線性方面之考慮	41
第 三 章 模 式	44
3—1 前 言	44
3—2 理想二極管	44
3—3 二極管之片斷式直線模式	47
3—4 非獨立性電壓及電流電源	49
3—5 三極管之片斷式直線模式及增量模式	51
3—6 五極管之片斷式直線模式及增量模式	56
3—7 電晶體之片斷式直線模式及增量模式	58
第 四 章 直線性放大器及直線性方程式系統	63
4—1 前 言	63

4—2	分析法則	63
4—3	直線性方程式系統	67
4—4	兩接線點對之裝置及網路	72
4—5	直線性放大器	83
第 五 章 電抗性元件及其頻率響應		94
5—1	前 言	94
5—2	電抗性負荷	94
5—3	高頻率模式	101
5—4	頻率響應	106
5—5	變壓器	114
第 六 章 推挽式功率放大器		126
6—1	概 述	126
6—2	推挽式功率放大器：A 類工作	126
6—3	推挽式放大器之圖解分析	133
6—4	推挽式放大器：A B 類及 B 類工作	140
6—5	互補對稱放大器	148
第 七 章 反饋放大器		151
7—1	前 言	151
7—2	反饋之基本觀念	151
7—3	反饋之種類	155
7—4	反饋電路示例	156
7—5	反饋放大器之穩定性	166
第 八 章 振盪器		169
8—1	前 言	169
8—2	反饋振盪器	169
8—3	負電阻振盪器	182
第 九 章 整 流		190
9—1	前 言	190

9-2 整流及濾波.....	190
9-3 電壓調節.....	199
附錄 A. 行列式.....	203
A-1 二次及三次行列式之展開.....	203
A-2 n 次行列式之解法.....	205
A-3 行列式之性質及更進一步求解方法.....	207
附錄 B. 富利葉級數.....	209
B-1 富利葉級數.....	209
附錄 C. 典型真空管之特性.....	211
C-1 6J5 中 μ 值三極管.....	211
C-2 12A7 高 μ 值雙三極管.....	212
C-3 2A3 功率三極管.....	213
C-4 6SJ7 銳截止五極管.....	214
C-5 6AU6-A 銳截止五極管.....	216
C-6 6978 束射功率管.....	217
附錄 D. 典型電晶體之特性.....	219
D-1 2N104 鎢質 PNP 接合式電晶體.....	219
D-2 2N109 鎢質 PNP 接合式電晶體.....	221
D-3 2N139 鎢質 PNP 接合式電晶體.....	221
D-4 2N647 鎢質 NPN 接合式電晶體.....	222
D-5 2N1479 矽質 NPN 功率電晶體.....	222
D-6 2N1905 鎢質 PNP 功率電晶體.....	223
D-7 2N173 鎢質 PNP 功率電晶體.....	223
索引 A. 依英文字母排列.....	224
索引 B. 依中文筆劃排列.....	229

第一章 電子裝置與固態裝置

1—1 前 言

在本章內，對用於電路元件（Circuit Elements）之電子裝置及固態裝置（Solid State Device），均一併予以討論。所討論之範圍，則偏重於闡述此兩種裝置，受外電路（External Circuit）影響後之性質及特性（Properties and Characteristics）。於其工作情況（Operation）時，凡涉及其實際構造（Physical Mechanisms）部份，均僅予概略敘述。若本書讀者，欲求對此類裝置中任何一種之作用，有更為詳盡之敘述，則可參閱其他同類標準課本。

1—2 兩接線點裝置（Two Terminal Device）：二極管（Diode）

兩接線點裝置之工作情況，通常使用兩種變數，對其加以說明；此兩種變數，一為通過該裝置之電流 i ，另一為跨接於其上之電壓（請參閱圖 1—1）。

一旦 i （電流）及 v （電壓）間之關係建立，即可對此種裝置予以完整之描述。例如：

1. 電阻器： $i = v/R$ (1—1)

2. 電容器： $i = C(dv/dt)$ (1—2)

3. 電感器： $v = L(di/dt)$ (1—3)

對於較為複雜之裝置， $v-i$ 間之關係可能需使用圖示方法，方可獲得明晰之說明。此種說明，稱為「伏特-安培特性曲線」（Volt-Ampere Characteristics）。

二極管為兩接線點裝置中之一種，從其 $v-i$ 特性曲線上即可看出，此種裝置，對某方向傳導電流，恒較其對另一方向傳導電流更為容易。二極管通常稱為整流管（Rectifier）。

二極管有二種類型，如下：

1. 真空二極管。
2. 固態型或半導體二極管（Solid State or Semiconductor Diodes）。

真空二極管之「伏特-安培特性曲線」，如圖 1—2 所示，圖中，對其電流及電壓之參考方向（Reference Direction）亦一併予以標出。

真空二極管之陰極，係使用一種稱為「熱游子放射」（Thermionic Emission）之方法，令其放射電子；凡使用此種方法（Process）者，必需具備一燈絲電路（Heater Circuit）。管內自陰極到達屏極（Plate）之電子數量，則視屏極電壓 e_b 之大小而定。當陰極所放射之電子均已全部到達屏極時，其曲線部份則轉為平直（飽和效應）。

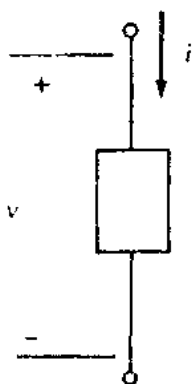


圖 1-1

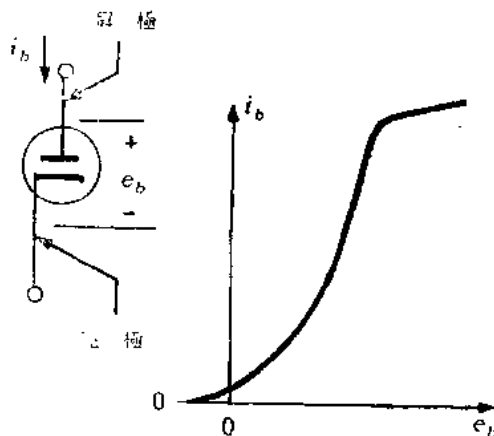


圖 1-2

此處應注意者，爲其電流決無可能變爲負值 (Negative)，唯當 $e_b = 0$ 時， i_b 則仍有少量之正值 (Positive) 電流通。

半導體二極管之「伏特-安培特性曲線」，如圖 1-3 所示，圖中，對其電流及電壓之參考方向，亦一併予以標出。

半導體二極管內之電流傳導，係由半導體材料 (Semiconductor Material) 中之電子、及電洞 (Holes) (短缺電子) 所完成。

在曲線上不難看到，當電壓變爲負值後，其電流亦變爲負值，唯在一廣闊之負值電壓變動範圍內，電流仍能維持爲一恒定之負值。以後當電壓變化達到「崩潰電壓」(Break down Voltage) 點時，則二極管之電流傳導量，將朝負值方向猛增；此種現象稱爲「崩潰效應」(Avalanche Effect)。

半導體二極管，不需具備體絲電路。

上述兩種電子裝置之特性曲線之理論算式，均可予以求出。

真空型二極管之算式如下：

$$i_b \cong k_0 e_b^n, \quad e_b > 0 \quad (1-4)$$

式中， k_0 爲一常數，視陰極之幾何結構、陰極所採用之材料、及陰極之溫度而定， n 亦爲一常數，其值約爲 1.5。

半導體二極管之算式爲：

$$i = I_0 \left[\exp \left(\frac{vq}{\lambda kT} \right) - 1 \right], \quad v > 0 \quad (1-5)$$

式中， I_0 及 λ 均爲常數，視其幾何結構、及所用之材料而定， q 爲電子之電荷， k 爲波茨曼常數 (Boltzman's Constant)， T 爲絕對溫度。半導體二極管特性之隨溫度而變化之情況，如算式 (1-5) 所示。

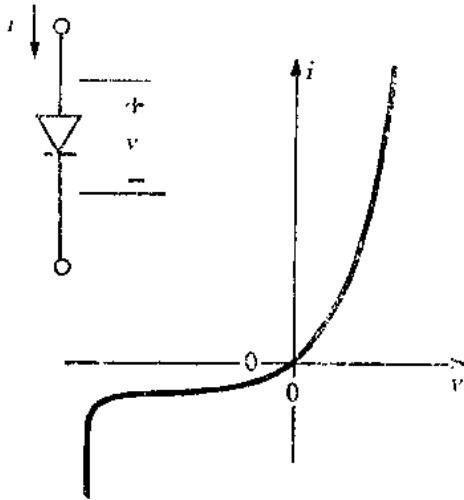


圖 1-3

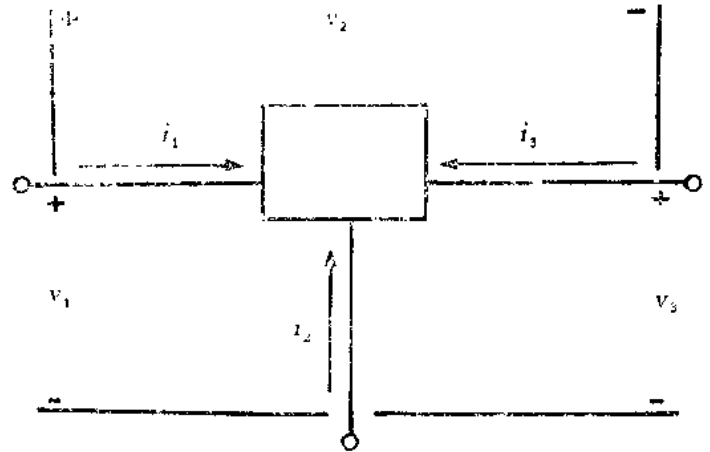


圖 1-4

1-3 三接線點裝置 (Three Terminal Devices) : 三極管 (Triode) 與電晶體 (Transistor)

從圖1-4中，吾人不難看出，三接線點裝置，使用三種電流及三種電壓即可對其予以說明。使用克希荷夫電流及電壓定律 (Kirchoff's Current and Voltage Law)，寫出下列方程式：

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (1-6)$$

$$-v_1 + v_2 + v_3 = 0 \quad (1-7)$$

自上列二方程式，吾人即可看出，其自變數 (Independent Variables) 僅有四種：其中兩種為電流，另兩種為電壓。

只要選擇出所欲使用之兩對變數後，三接線點裝置，即可經由描述各個變數間之相互關係，而予以完整之說明。

設有一三接線點裝置，其結構與一真空型二極管大同小異，除具有屏極 (Plate) 及陰極 (Cathode) 而外，並另有一用於控制通過此一裝置電流之電極。此種裝置，稱為「真空型三極管」 (Vacuum Triode)，其控制電極則稱為「柵極」 (Grid)。

圖 1-5 中所示，即為三極管之電流及電壓參考方向之說明。

圖 1-5 中所示之特性曲線，稱為「屏極特性曲線」 (Plate Characteristics)，因其兩種主要變數一為屏極電流 i_b ，一為屏極電壓 e_b 。為使屏極特性曲線，能由縱橫兩種座標格子顯示出來，故其第三種變數：柵極電壓，係以參變數 (Parameter) 方式出現。

請注意，在屏極特性曲線圖中，柵極電流並未予繪出。因為在正常工作時， $e_c < 0$ ，在此種條件下， $i_c \approx 0$ 。

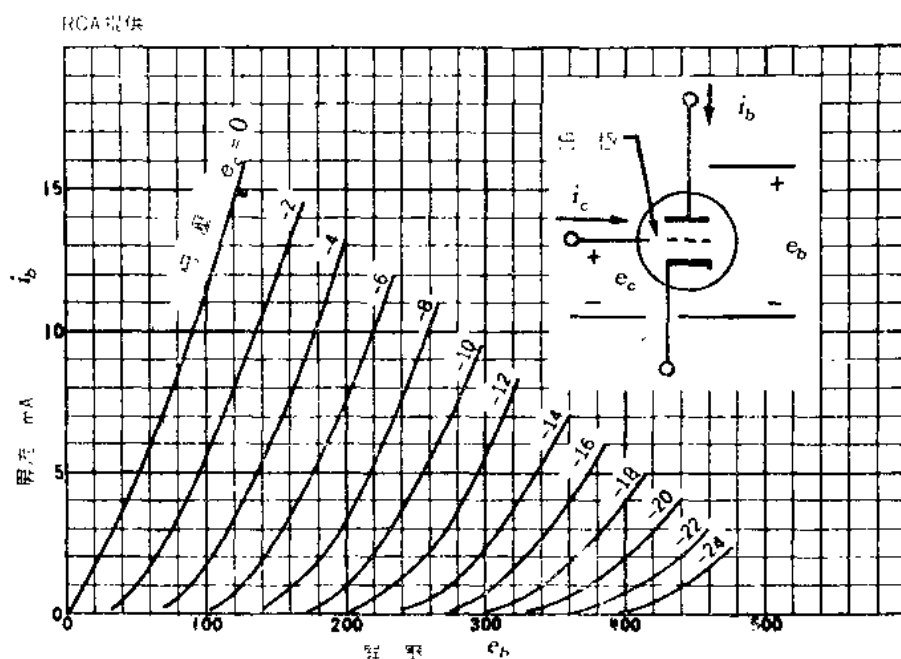


圖 1-5 平均屏極特性曲線

當 $e_c > 0$ 時，為 e_c 及 e_b 函數之 i_c 變動情況，如圖 1-6 所示。圖中應注意者為：當屏極電壓够高時， i_c 不再隨 e_b 之變化而變動，並幾乎全隨 e_c 之變化而作直線性之變動。

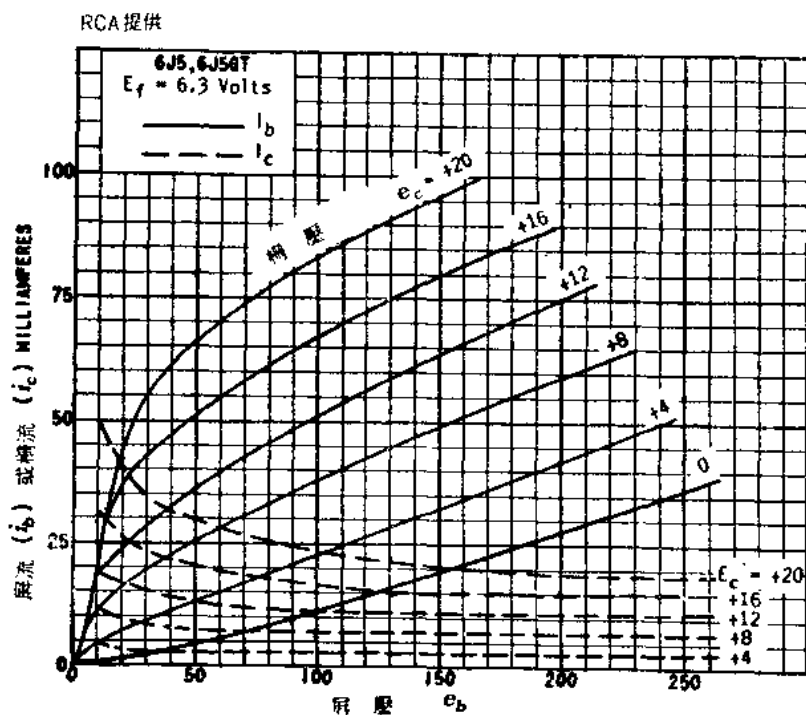


圖 1-6 正值柵極電壓特性曲線

在大多數實際狀況下，當 $e_c < 0$ 時， i_c 可視之為等於零。在本書以後各章內，均以此為準。因三極管之構造，與二極管大同小異，故其屏極電流，亦絕不會變為負值。

以下討論與真空型三極管相當之固態裝置：電晶體 (Transistor)。大多數之電晶體，均為三接線點裝置，但又分為兩大類別：

1. PNP 型電晶體
2. NPN 型電晶體

上述兩大類電晶體，就其工作原理而言，是完全相同的，其主要差異，則在於其製作方法之不同。

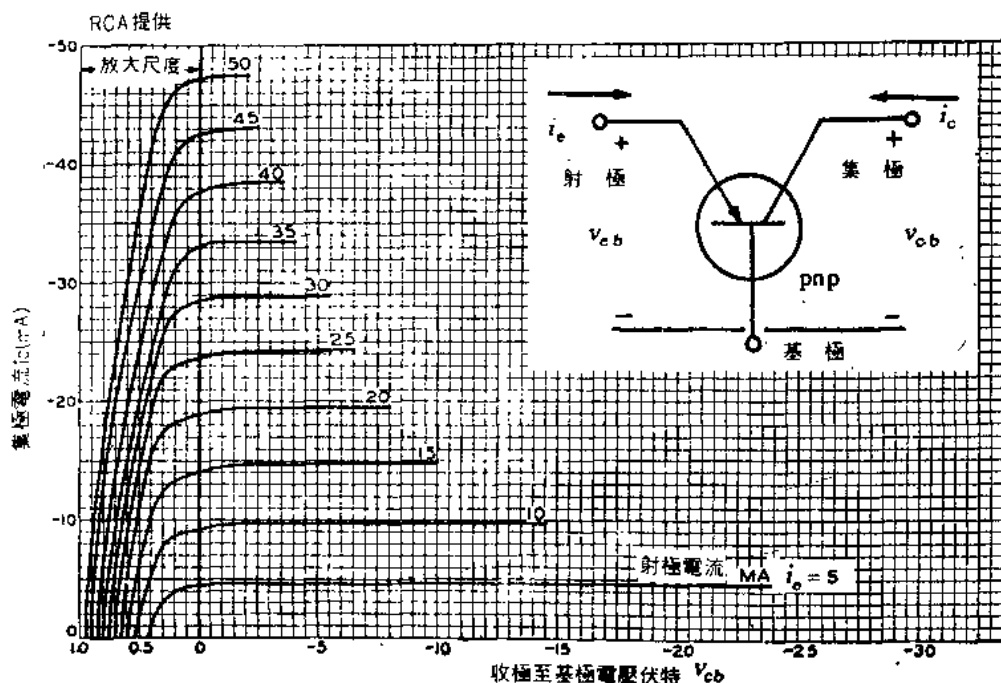


圖 1-7 a 2N 104 之平均收極 (Collector) 特性曲線 (公用座極連接法)

圖 1-7 及圖 1-8，除分別標出此兩大類電晶體之電流及電壓參考方向外，並另就

1. 公用基極連接法 (Common Base Connection)
2. 公用射極之收極特性連接法 (Common Emitter Connection)

分別以圖示法，繪出其典型之特性曲線。此兩圖之差異，則在於當作控制參數 (Control Parameter) 用之自變數 (Variable) 之互不相同。

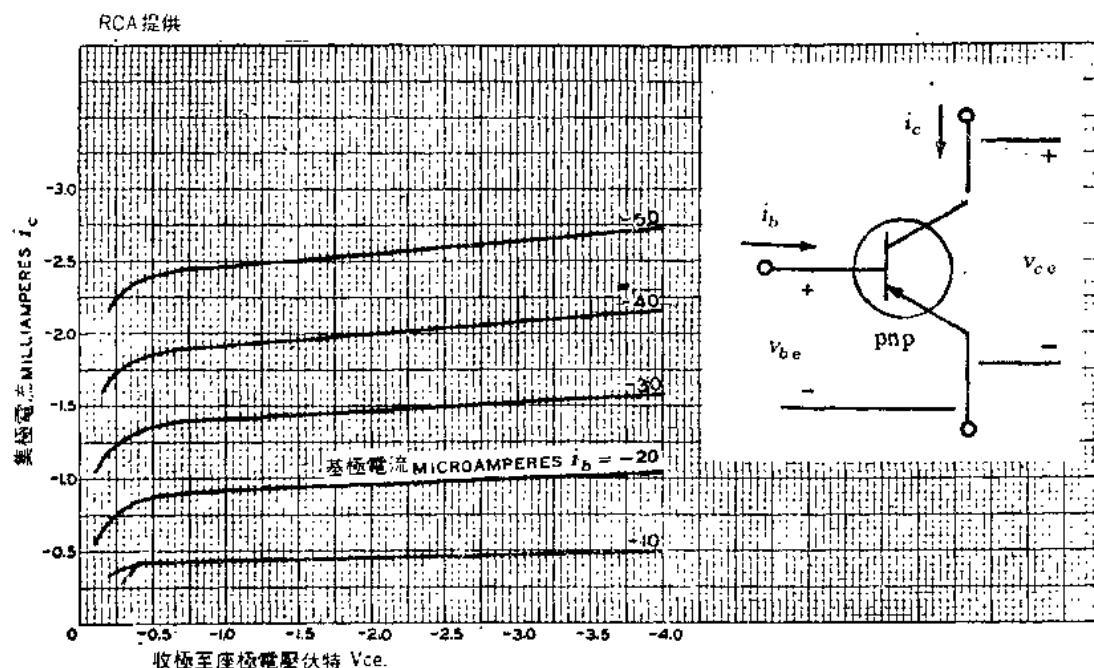


圖 1-7 b 2N104 之平均收極特性曲線 (公用射極連接法)

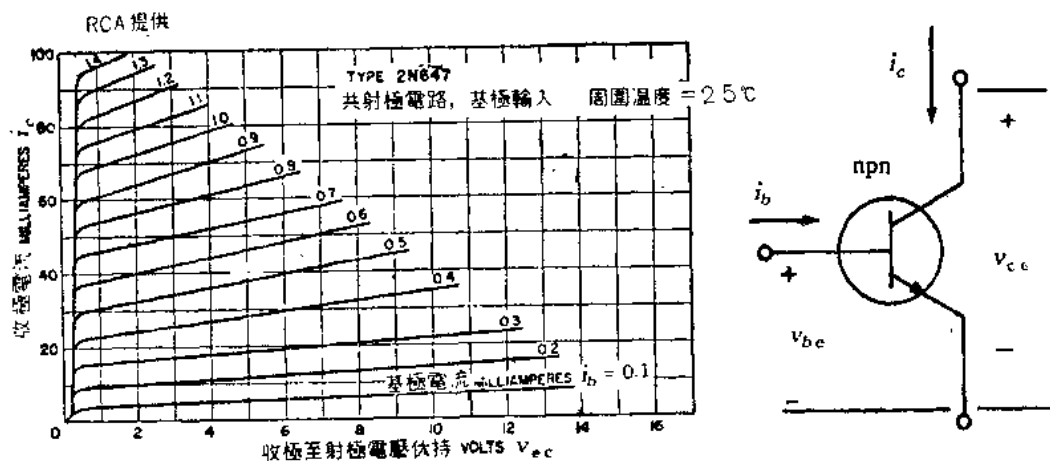


圖 1-8 典型之收極特性曲線 (公用射極連接法)

電晶體之重要特性曲線之一，為其 i_c 及 v_{eb} 間之關係曲線。電晶體公用座極連接法之此種關係曲線，如圖 1-9 所示。

請注意 v_{eb} 之數值，其值極低，約為十分之幾伏特。由於此種情況，故在其大部份工作範圍 (Operating Range) 內， v_{cb} 近乎等於 v_{ce} 。

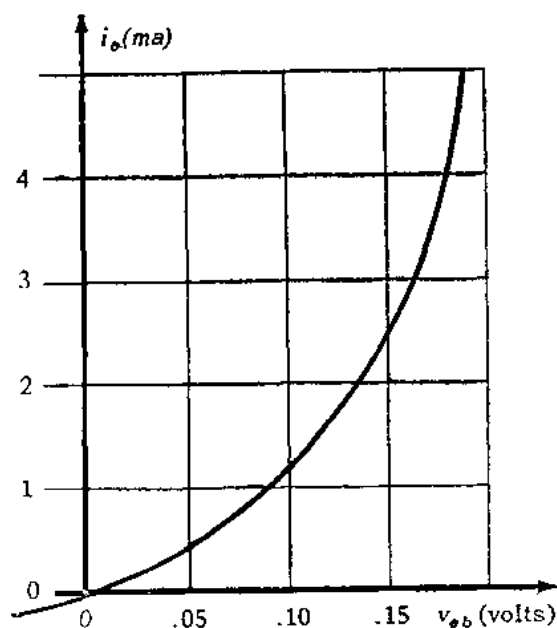


圖 1-9

爲便於將三極管與電晶體作一比較，吾人可作下述比喻：

1. 座極 (Base)，相當於柵極。
2. 收極 (Collector)，相當於屏極。
3. 射極 (Emitter)，相當於陰極。

讀者應熟記心中，上述之比喻，僅爲一種概略之比較。

1-4 多電極式裝置及氣體管 (Gas Tube)

爲求改善三極管在某方面之性質，在管中另行增加一個電極；即柵極，而製出一種新型真空管。

此種改善，或爲使放大器 (Amplifier) 獲得較高增益，獲致較佳頻率響應 (Frequency Response)，或爲使其特性曲線之直線性獲得改善。

在多電極型真空管中，較爲重要之兩種，一爲四極管 (Tetrode)，具爲四個電極；一爲五極管 (Pentode)；具有五個電極。

圖 1-10 所示，爲四極管之符號簡圖，四極管具有下述之四個電極：

1. 屏極 (Plate)。
2. 陰極 (Cathode)。
3. 控制柵極 (Control Grid)，或稱第一柵極。
4. 簾柵極 (Screen Grid)，或稱第二柵極。

圖 1—11 所示，為五極管之符號簡圖，五極管具有下述之五個電極：

1. 屏極。
2. 陰極。
3. 控制柵極，或稱第一柵極。
4. 簾柵極，或稱第二柵極。
5. 抑制柵極 (Suppressor Grid)，或稱第三柵極。

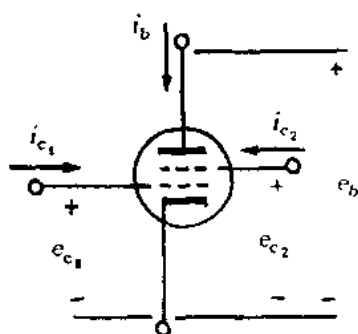


圖 1—10

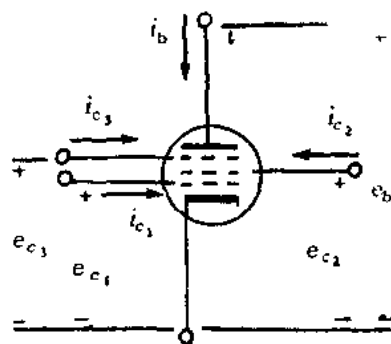


圖 1—11

無論在五極管中或在四極管中，其屏極與陰極之功用，均與二極管與三極管同，但其各個柵極之功用，則各不相同如下：

1. 控制柵極：為控制用之電極，作用與三極管中之控制柵極同。輸入信號，通常加於此柵極上。

2. 簾柵極：用作控制柵極及屏極間之屏蔽 (Shield)，以降低控制柵極與屏極間之電容量，進而延伸其頻率響應 (Frequency Response)。簾柵極通常對陰極保持有一恒定之正性電壓。

3. 抑制柵極：用於減低來自屏極之二次電子放射，抑制柵極通常直接連接至陰極上。

由於簾柵極對陰極而言，通常保持有一正性電壓，故會捕捉一部份由陰極所放射出來之電子，因此有簾柵電流 i_{c2} 之流通，而不可予以忽略。

圖 1—12 所示，為四極管之典型屏極特性曲線，與三極管中之情形一樣，當 $e_{c1} < 0$ 時， $i_{c1} \cong 0$ 。

圖 1—13 所示，為五極管之典型屏極特性曲線。當 $e_{c1} < 0$ 時，控制柵極之電流為零，即 $i_{c1} \cong 0$ 。在正常工作情況下， $e_{c3} = 0$ ，因之 $i_{c3} \cong 0$ ，而 $e_{c2} > 0$ ，故 $i_{c2} > 0$ 。圖 1—13 中所示之斷續曲線 (Broken-Line Curve)，即為 e_{c2} 維持於一恒定電壓， $e_{c1} = 0$ 時之 i_{c2} 特性曲線。

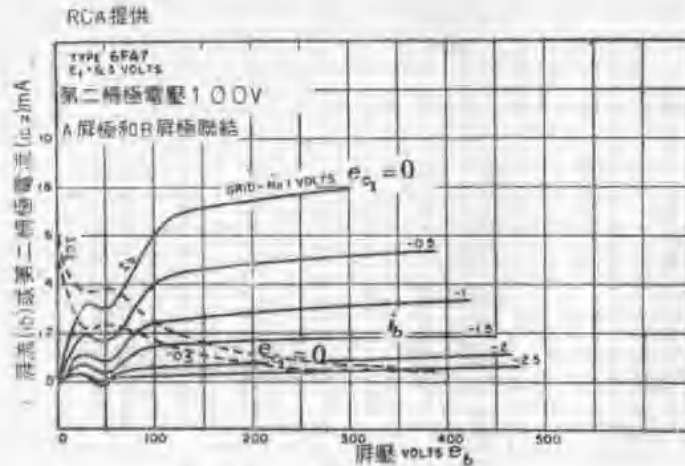


圖 1-12 平均屏極特性曲線

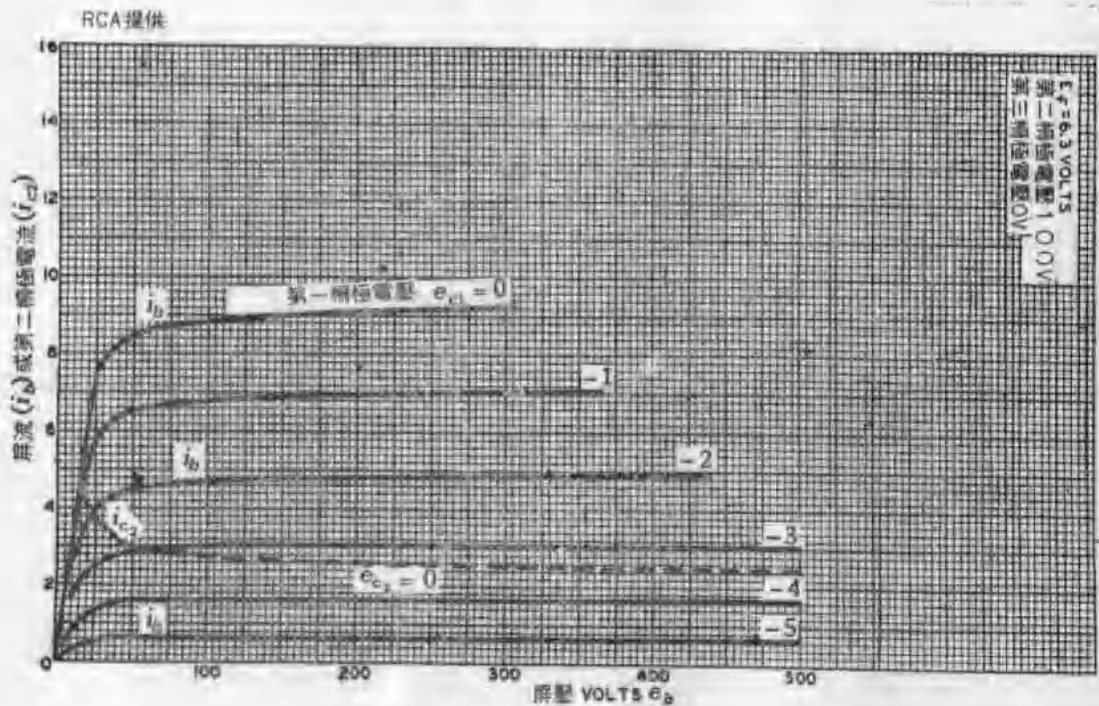


圖 1-13 6SJ7 之平均屏極特性曲線

圖 1-14 中所示，為 i_{c2} 受 e_{c2} 及 e_{c1} 之影響所產生之變化。若屏極特性曲線係於 $e_{c2} = E$ 時繪出，而此一電壓現已改變至 KE ，則新產生之屏極特性曲線，可大略由下述辦法求出：

1. 將每類電壓之格數 (Voltage Scale)；即 e_b 及 e_{c1} 格數，全部乘以 k 。
2. 將電流格數 (Current Scale) 乘以 $k^{3/2}$ 。

若圖 1-14 所示之廉柵極特性曲線無法取得，則可自屏極特性曲線中求得廉柵極電流之近