

現代電子技術叢書

基本電子電路原理

曾煥燃編譯 · 萬里書店出版



**BASIC
ELECTRONIC
CIRCUIT
THEORY**

基本電子電路原理

曾煥燃編譯

香港萬里書店出版

現代電子技術叢書

基本電子電路原理

曾煥燃編譯

出版者：萬里書店有限公司
香港北角英皇道486號三樓
電話：5-632411 & 5-632412

承印者：金冠印刷有限公司
香港北角英皇道499號六樓B座

定價：港幣十八元

版權所有 * 不准翻印

(一九八〇年五月版)

編譯者的話

本書是根據 Robert Boylestad 及 Louis Nashelsky 合著的“Electronic devices and circuit theory”一書的第二版編譯的。內容比較豐富，對基本電子電路的原理作了較為詳細的分析，很適合學習電路原理及設計的讀者參考。

本書的特點是例題很多，通過例題的演算，可以幫助讀者理解電路的原理及運用剛學到的知識；此外，大量的插圖也是本書的特點之一，幾乎每一道例題都有詳細的插圖表示出設計電路時的每一個運算步驟，這一點對於自學的讀者幫助最大。

限於篇幅，本書只將原著介紹基本電子電路的部份編譯出來，數字電路、電源電路等不包括在內，讀者可以參閱其他有關的讀物。

本書譯稿，同事黎君曾作過仔細校閱，謹在此表示衷心感謝。

本書是筆者利用業餘時間編譯的，執筆時雖然力求避免出錯，但限於個人的水平，相信書中一定還存在不少錯誤，希望讀者在閱讀後把發現告知，以便有機會再版時改正。

曾煥燃 謹識

1980年1月1日於香港

目次

編譯者的話	I
第1章 晶體管的特性	1
1.1 第一個晶體管	1
1.2 晶體管的結構	2
1.3 晶體管的工作	3
1.4 晶體管的放大作用	6
1.5 共基極電路	7
1.6 共發射極電路	11
1.7 共集電極電路	18
1.8 晶體管最大額定值	20
1.9 晶體管的封裝及電極的表示方法	22
第2章 直流偏壓	24
2.1 概論	24
2.2 工作點	25
2.3 共基極偏壓電路	28
2.4 共發射極電路接法——一般偏壓電路的考慮方法	32
2.5 固定偏壓電路的偏壓考慮方法	34
2.6 固定偏壓電路的偏壓點的計算	36
2.7 偏壓穩定	39
2.8 使用發射極電阻的直流偏壓電路	47
2.9 與 β 值無關的直流偏壓電路	50
2.10 電壓回輸電路的直流偏壓計算	53
2.11 共集電極(射極輸出器)直流偏壓電路	56
2.12 直流偏壓的圖解分析法	59

2.13 直流偏壓電路的設計	67
2.14 其他偏壓電路	73
第 3 章 小信號分析	78
3.1 簡 介	78
3.2 晶體管 h-等效電路	81
3.3 h-參數的圖解法	85
3.4 用實驗法求 h-參數	90
3.5 基本晶體管放大電路使用 h-等效電路的小信號分析	93
3.6 h-等效電路的近似算法	112
3.7 近似基極、集電極及發射極等效電路	130
第 4 章 多級系統及頻率響應	143
4.1 一般級聯系統	143
4.2 阻容交連放大器	145
4.3 變壓器交連的晶體管放大器	153
4.4 直接交連的晶體管放大器	156
4.5 共射共基放大器	159
4.6 達林頓複合接法	162
4.7 頻率方面的考慮	166
4.8 單級晶體管放大器低頻的考慮	171
4.9 單級晶體管放大器高頻的考慮	179
4.10 多級頻率影響	187
第 5 章 大信號放大器	191
5.1 概 論	191
5.2 串聯饋電甲類放大器	192
5.3 變壓器交連的音頻功率放大器	196
5.4 放大器工作的分類及失真	207
5.5 推挽放大器電路	216
5.6 包括無輸出變壓器電路的各種推挽電路	221
5.7 功率晶體管的散熱	232
第 6 章 回輸放大器及振盪器電路	238
6.1 回輸的概念	238

6.2 回輸連接形式	243
6.3 實用的電壓-串聯負回輸放大器電路	249
6.4 其他實用的回輸電路接法	251
6.5 回輸放大器的穩定度——相位及頻率的討論	258
6.6 回輸電路作為振盪器的工作	262
6.7 相移振盪器	264
6.8 考畢子振盪器	269
6.9 哈脫萊振盪器	274
6.10 晶體振盪器	276
附錄 h-參數的正確及近似換算公式	281

第 1 章

晶體管的特性 (Transistor Characteristics)

1.1 第一個晶體管 (The First Transistor)

1947 年 12 月 23 日是電子行業值得紀念的一個日子，在那一天，沃爾特 H. 布拉頓 (Walter H. Brattain) 及約翰·巴頓 (John Barden) 在貝爾電話實驗室證明了第一個晶體管的放大作用，這個劃時代的創舉給電子工業帶來了全新的局面，也為半導體器件的發展奠定了牢固的基礎。圖 1.1 所示便是第一個晶體管的廬山真面目（這是一個點接觸式晶

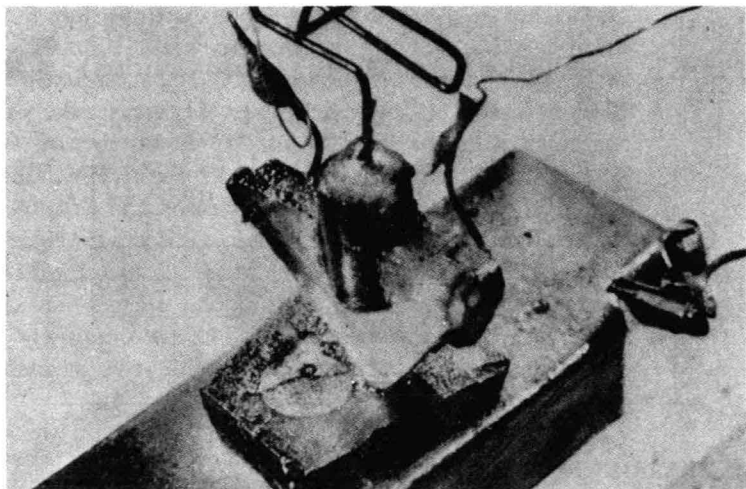


圖 1.1 第 1 個晶體管

體管)。

顯而易見，和傳統的電子管比較，晶體管有很多優點：它小型、重量輕，不用發熱絲，沒有熱損耗，結構穩固、效率高，不必經過加熱的工序便可以立即投入工作，只須很低的工作電壓就可以工作。早期，當晶體管還不是十分完善時，它只能工作於低功率及低頻率範圍，但經過多年的努力，半導體元件能夠承受的功率和頻率，不但不亞於今天的電子管而且有所超越了。

1.2 晶體管的結構 (Transistor Construction)

晶體管是由三層半導體材料組成，一種是由兩塊N型半導體材料夾着一塊P型半導體材料，另一種則由兩塊P型夾着一塊N型，前者叫做NPN晶體管，後者叫做PNP晶體管。兩者的構造如圖1.2所示，它們還須加上適當的直流偏壓(dc biasing)。從結構上看，中間層半導體的厚度小於外層半導體很多，像圖中所示，兩者之比是0.150英寸：0.001英寸=150：1。中間層所摻入的雜質也少於外層很多（一般是10：1或更小）。通過限制“自由”載流子(“free” carriers)的數目，

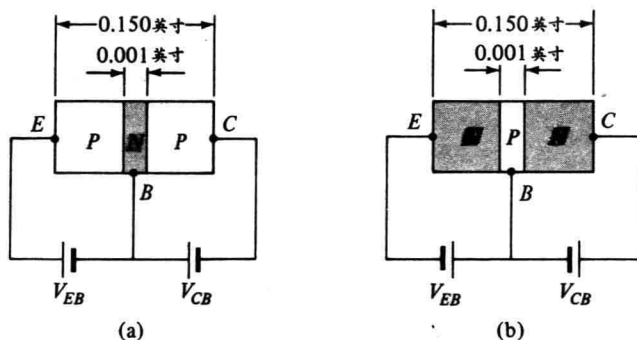


圖 1.2 晶體管的形式: (a) PNP; (b) NPN

摻入較少的雜質將減少它的導電率 (conductivity) 或增加電阻。

在圖 1.2 中，我們用 E、B、C 代表晶體管的三個電極，其中 E 代表發射極 (emitter)，B 代表基極 (base)，C 代表集電極 (collector)。

1.3 晶體管的工作 (Transistor Operation)

以下我們將以圖 1.2 的 PNP 晶體管作例子，來談談晶體管的工作原理；對 NPN 晶體管而言，只要將電子和空穴 (hole) 的作用對調，便完全可以解釋它的工作原理。

在圖 1.3 中，我們將 PNP 晶體管的基極-集電極偏壓略去，這時剩下的發射極-基極結，便好像一個加上正向偏壓 (forward-biased) 的二極管，耗盡區 (depletion region) 變小 (與施加的正向偏壓有關)。結果一股數量很多的多數載流子 (majority carriers) 從 P 型半導體流向 N 型半導體。

接着，讓我們再將圖 1.2(a) 的 PNP 晶體管基極-發射極偏壓去掉 (見圖 1.4)，這時的基極-集電極就像加上反向偏壓 (reverse-biased) 的二極管，因而耗盡區變大，多數載流子的流動變零，只有少數載流子 (minority carriers) 流動。總括來說：晶體管的一個 p-n 結加上了反向偏壓，另一個 p-n 結則加上正向偏壓。

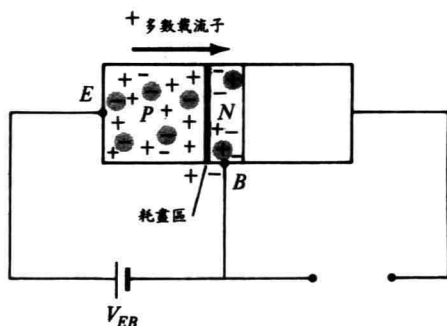


圖 1.3 PNP 晶體管的正向-偏壓結

圖 1.4 PNP 晶體管的反向-偏壓結

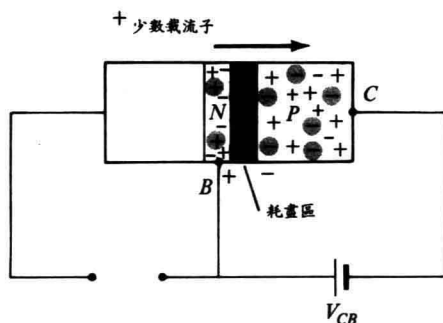
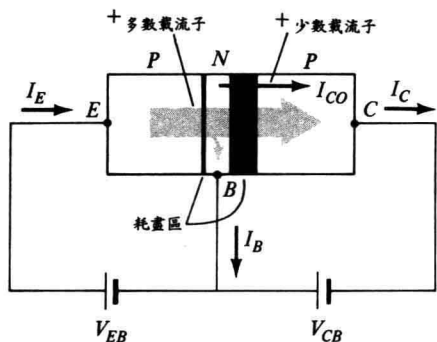


圖 1.5 PNP 晶體管的多數載流子及少數載流子的流向



在圖 1.5 中，我們將正向偏壓及反向偏壓一齊施加在 PNP 晶體管上，這時多數載流子及少數載流子的流向如圖上所示，從耗盡區的寬度可以明顯地分辨出哪一個 P-N 結加上正向偏壓，哪一個 P-N 結加上反向偏壓。在圖 1.5 中可以看到多數載流子將沿着加上正向偏壓的 PN 結向 N 型半導體擴散。但問題是，這些載流子將直接變成基極電流 I_B 或直接流至 P 型半導體呢？正如前面介紹過的，夾在中間的 N 型半導體在結構上做得非常薄，而且傳導率 (conductivity) 十分低，因而只有一小部份的載流子沿着這一高電阻的通路流至基極端子，和發射極及集電極電流比較，基極電流的數量級一般只有 μA ，而前者則為 mA 。多數載流子的絕大部份仍然沿着加上反向偏壓的 p-n 結向和集電極端子相連的 P 型半導體擴散(見圖 1.5)。由於集電極加上很大的反向偏壓，這個

電壓在集電結上產生的電場對於從基極向集電結擴散的多數載流子來說是加速電場，因此多數載流子只要擴散到集電結，將被這個電場加速而穿過集電結，被集電極所吸收，形成集電極電流。

根據克希荷夫 (Kirchhoff) 電壓定理，將圖 1.5 中的晶體管視為一個結點 (node)，則可得

$$I_E = I_C + I_B \quad (1.1)$$

從上式可知，發射極電流等於集電極電流和基極電流之和。其中集電極電流還包括兩個部份，如圖 1.5 所示，這與多數載流子及少數載流子有關。少數載流子電流又叫做洩漏電流 (leakage current)，用符號 I_{CO} 表示。因而總的集電極電流應該根據下式計算：

$$I_C = I_C (\text{多數載流子}) + I_{CO} (\text{少數載流子}) \quad (1.2)$$

一般， I_C 的大小有 mA 數量級，而 I_{CO} 則只有 μA 或 nA (毫微安) 數量級。 I_{CO} 對溫度變化的反應很敏感，當應用在溫度變化很利害的場合，一定要充份注意到。這一點，在今後談到電路的穩定度 (stability) 時會作進一步的解釋。

今天，晶體管製造技術的發展，已經使到有些晶體管的 I_{CO} 的電平很低，甚至已達可以忽視的地步。不過對於大功率元件來說，其 I_{CO} 的典型值仍然有 μA 數量級。

圖 1.2 的 PNP 及 NPN 晶體管的接法叫做共基極 (common-base) 接法，因為相對於發射極及集電極來說，基極是一個公共端。在共基極電路中。當 V_{CB} 的數值一定時， I_C 的微小變化量和 I_E 的微小變化量的比率叫做共基極、短路放大系數 (common base, short-circuit amplification factor)，用符號 α (alpha) 表示。

用等式表示， α 的大小是

$$\alpha = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \right|_{V_{CB} = \text{常數}} \quad (1.3)$$

所謂短路的意思，是表示當計算 α 時，負載 (load) 是短路的。關

於這一點第 3 章會再談到。 α 的典型值一般是 0.90~0.998。在實際應用中，事實證明，很多時可以使用下述近似的 (approximation) 計算公式：

$$\alpha \cong \frac{I_C}{I_B} \quad (1.4)$$

這裏，在晶體管特性的某一點上， I_C 及 I_E 各自代表集電極及發射極電流的大小。

公式 (1.3) 及 (1.4) 是根據元件的特性或網絡條件計算 α 的。嚴格來說， α 只是圖 1.5 的發射極 P 型半導體所具有的空穴(多數載流子)到達集電極端子的百分比的測量值，正如公式(1.2)所下的定義那樣。所以

$$I_C = \alpha I_E (\text{多數載流子}) + I_{C0} (\text{少數載流子}) \quad (1.5)$$

1.4 晶體管的放大作用 (Transistor Amplifying Action)

共基極接法的基本電壓放大作用可以通過圖 1.6 的電路來理解。對於這種電路來說，晶體管發射極和基極間的輸入電阻 (input resistance) 一般在 20~200 Ω 之間變化，而輸出電阻 (output resistance) 則在 100k 至 1M 之間。電阻的變化與輸入端 (基極發射極) 的正向偏壓結及輸出端 (基極-集電極) 的反向偏壓結有關。取它們的有效值 (effective value) 及平均值，設輸入電阻為 100 Ω ，則

$$I = \frac{200 \times 10^{-3}}{100} = 2 \text{ mA}$$

如果在這個電路中，我們設 $\alpha = 1$ ($I_C = I_E$)，那麼

$$I_L = I = 2 \text{ mA}$$

及

$$V_L = I_L R = (2 \times 10^{-3}) (5 \times 10^3)$$

$$V_L = 10 \text{ V}$$

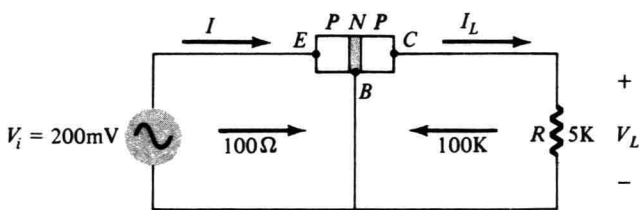


圖 1.6 共基極接法的基本電壓放大動作

那麼，電壓放大倍數 (Voltage amplification) 是：

$$A_v = \frac{V_L}{V_i} = \frac{10}{200 \times 10^{-3}} = 50$$

共基極接法的電壓放大倍數，一般典型的數值是 20 ~ 100。而電流放大倍數 (current amplification) (I_C/I_E) 則多數少於 1。顯而易見，後一個特性是基於 $I_C = \alpha I_E$ ，而 α 永遠小於 1 的緣故。

從以上的解釋可知，晶體管的放大作用，其實是通過從一個低至高阻值電路轉移 (transferring) 電流來獲得的，所以晶體管的正確叫法應該是變阻器 (transfer resistor)，當晶體管才出現時，早期的中文文獻也會譯作“變阻器”。事實上，英文字晶體管 (transistor) 便是由“變阻器” (transfer resistor) 拼寫得來的：

$$\text{transfer} + \text{resistor} = \text{transistor}$$

1.5 共基極電路 (Common-Base Configuration)

圖 1.7 所示是採用共基極接法的 NPN 及 PNP 晶體管的符號及各回路電流的流向，圖示是國際慣用的畫法，常見於一般參考書及手冊中，在本書中，電流的流向將依照傳統的畫法，而不是根據電子流的流向，理由是，無論過去或現代的書刊，都一直習用這一傳統的用法。

有些教科書在介紹晶體管的基本工作原理時，令電流的流向向全部流

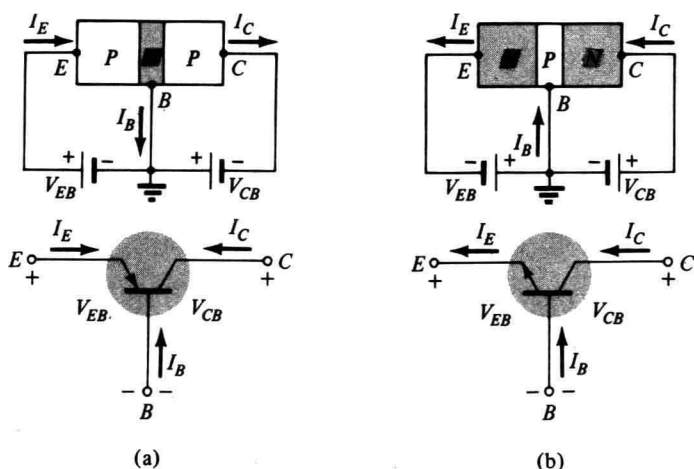


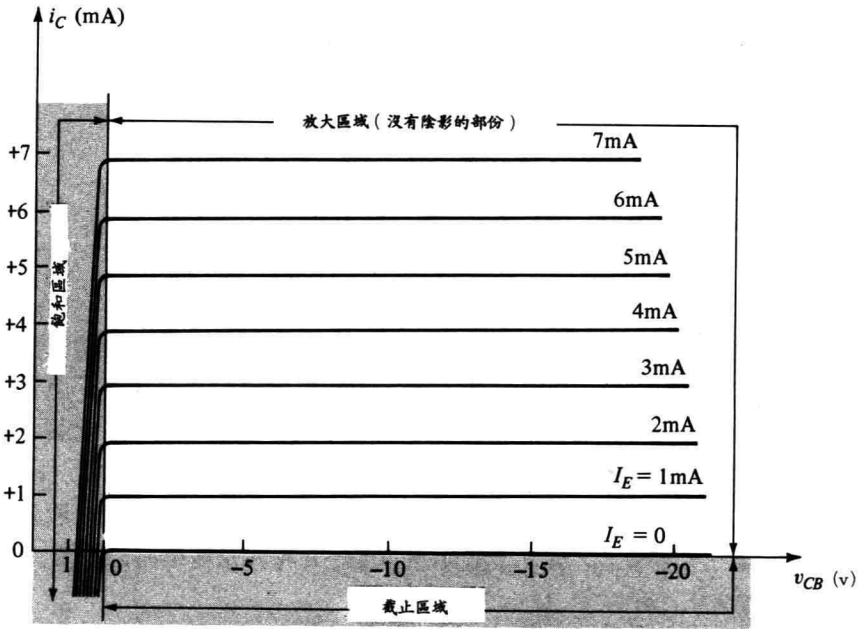
圖 1.7 共基極接法使用的符號及極向：(a) PNP 晶體管，(b) NPN 晶體管

入晶體管，並且將其中的一個電流量用負號表示，以符合克希荷夫電流定理。換句話說，如果習慣的流向是相反的話，便要用一個負號來表示，為清楚起見，圖 1.7 所表示的電流，是表示晶體管在放大區(active region) 工作時真正的電流流向。要注意的是，晶體管符號的發射極箭咀，是 I_E 流向的習慣表示法。

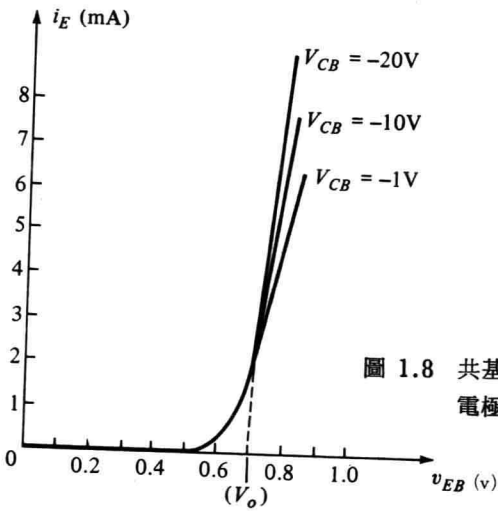
在共基極電路中，外加的電位一般是相對於基極電位而言，所以外加電位用 V_{EB} 及 V_{CB} 表示，這裏第二個下標(subscript) 是用來表示晶體管接地方式，第一個下標則用來表示晶體管的高壓點，如圖 1.7 所示，這在國際上是慣用的。對於 PNP 晶體管， V_{EB} 是正的， V_{CB} 是負的(見圖 1.8 的特性圖)；但 NPN 晶體管的 V_{EB} 為負、 V_{CB} 為正。

此外，要清楚地表示出圖 1.7 的 PNP 共基極晶體管的特性，應該用兩組特性曲線，一組表示輸入電路，一組表示輸出電路。

圖 1.8 (a) 的輸出特性(或叫集電極特性)，是表示集電極電流與集電極至基極電壓和發射極電流。如圖 1.8 (a) 所示，集電極特性可分為三個區域，即：放大區、截止區(cutoff region) 及飽和區(saturation



(a)



(b)

圖 1.8 共基極的 PNP 晶體管的特性: (a) 集電極特性; (b) 發射極特性

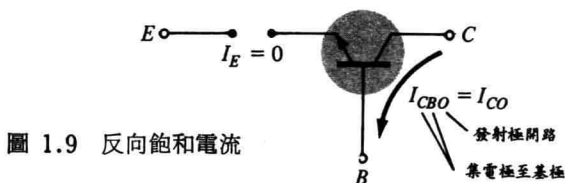


圖 1.9 反向飽和電流

region)。

在放大區，集電結是反向偏壓，而發射結是正向偏壓。這個條件可以參考圖 1.6 的情形。只是在放大區才適宜作信號的放大之用，而令信號保持最小的失真。當發射極電流 (I_E) 是零時，集電極電流便如圖 1.8 (a)，只含反向飽和電流 (reverse saturation current) I_{CO} 。和 I_C (mA) 的垂直坐標相比較，電流 I_{CO} 是十分小的 (μA)，當 $I_C=0$ 時，看起來就像在同一水平線上。圖 1.9 表示出當 $I_E=0$ 時共基極電路的情況，在特性數據表上，經常用 I_{CBO} 來表示 I_{CO} 。

要注意，在圖 1.8(a) 中，發射極電流的增加大於 0 時，集電極電流的增加略小於 ($\alpha < 1$) 發射極電流，這正如根據基本晶體管電流關係計算的一樣。同時需要指出的是，在放大區域的集電極電流，同樣忽視了 V_{CB} 的影響。

在截止區域 (cutoff region)，集電極及發射極結都是施加反向偏壓。其結果正如圖 1.8 (a) 所描述的那樣，集電極電流也可忽略不計。

將 V_{CB} 的水平坐標向 0V 的左方延長，這個區域所表示的特性便叫做飽和區 (saturation region)。在飽和區，集電極及發射極結都是加上正向偏壓。在這一區域，集電極至基極電位稍有變化，集電極電流將作指數式變化 (exponential change)。

如圖 1.8(b) 所示，輸入或發射極特性只有一個令人感興趣的放大區，在固定的集電極電壓 (V_{CB}) 數值下，當發射極至基極電位增加時，發射極電流亦增加。換一句話說，對於一個固定的集電極電位，當正向偏壓電位增加時，多數載流子 (I_E) 通過正向偏壓結的流動將會增加。

例題 1.1 根據圖 1.8 的特性曲綫，試求：