

第六章 電晶體放大電路

※6-1 放大器基本特性

1. 將微弱信號放大之裝置稱為放大器，可分為電壓放大器、電流放大器、功率放大器。

2. 小信號放大器(電壓放大器)

- (1). 定義：一放大器輸入訊號的大小可使其輸出與輸入之間能維持線性關係者，即將此輸入訊號稱為小訊號。
- (2). 作用：針對振幅較小的微弱訊號電壓予以線性的電壓放大，此電路特性的要求，偏重在線性放大和電壓增益。
- (3). 特性：
 - A. 放大輸入約微伏(μV)~毫伏(mV)的微弱訊號。
 - B. 工作於特性曲線的線性範圍，以不失真為主。
 - C. 集極電壓的變化僅佔所加直流電壓的一小部分。
 - D. 分析小信號放大器時，通常將其所用的主動元件，轉換成適切的線性等效電路。

3. 放大器的基本組成元件

- (1). 主動元件：電晶體(BJT 及 FET)、真空管。
 - (2). 被動元件：電阻、電感、電容。
 - (3). 電源供應器：提供電晶體偏壓用。
4. 放大器的增益：可分為電壓增益、電流增益、功率增益。

名稱	電壓增益	電流增益	功率增益
定義	$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_{o(p-p)}}{v_{i(p-p)}}$	$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_{o(p-p)}}{i_{i(p-p)}}$	$A_p = \frac{P_o}{P_i} = \frac{v_o i_o}{v_i i_i} = A_i A_v$
	v_i ：輸入電壓 v_o ：輸出電壓 p-p：峰對峰值	i_i ：輸入電流 i_o ：輸出電流	P_i ：輸入功率 P_o ：輸出功率

5. 放大器的失真：經過放大器放大後的波形若與原波形不同，及產生扭曲及變形現象成為失真，失真可分為波幅失真、頻率失真、相位失真、互調失真。

- (1). 波幅失真：又稱為諧波失真或非線性失真。由於元件之特性曲線為非線性，以致在輸出訊號時產生輸入訊號所沒有的諧波(harmonic)而使輸出波幅產生失真現象。
 - A. 諧波頻率為輸入訊號頻率的 N 倍，而其波幅則為輸入訊號波幅的 $1/N$ 倍， N 代表諧波次數。
 - B. 諧波失真主要是由偶次諧波造成，其中最嚴重的為二次諧波。
 - C. 波幅失真產生的原因：(A)工作點不適合，位於非線性區域。(B)輸入訊號太大，而超出飽和或截止區。(C)輸出訊號中，有諧波產生。
- (2). 頻率失真：放大器對不同頻率的輸入訊號，放大不同的倍數，此種現象稱為頻率失真。
 - A. 原因：由於裝置內部電容或電感之阻抗為頻率的函數，所以頻率不同時，阻抗也不同，故頻率響應非一水平直線。
- (3). 相位失真：放大器對不同頻率的輸入訊號有不同的相位移，此種現象稱為相位失真或延遲失真。
 - A. 原因：由於電容或電感之阻抗為頻率的函數，所以不同頻率之阻抗相位也不相同，以致產生相位失真
- (4). 互調失真：當兩個以上頻率相差甚大同時送至放大器內，可能因非線性而產生調制波形，即在輸出端有兩個以上的訊號相加或相減之波形稱為互調失真。

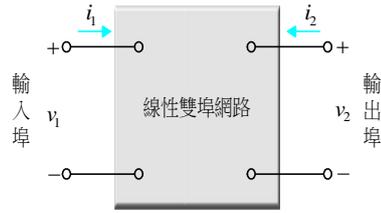
※6-2 交流等效電路

1. 等效電路：將繁雜電路簡化成其值不變而易於分析的簡單電路。
2. 小信號等效電路主要分析放大器之輸入阻抗、輸出阻抗、電壓增益、電流增益、功率增益。
3. 電晶體等效電路：圖(6-2-1)中叫雙埠網路，其內含輸入埠及輸出埠，輸入埠有輸入電壓 v_i 及輸入電流 i_i ，輸出埠有輸出電壓 v_o 及輸出電流 i_o ，利用輸入端及輸出端點之電壓與電流關係可測定。

4. 參數：當電晶體加上交流訊號時，各極間電壓、電流與電阻之間，存在一互動的因數關係，即稱為電晶體參數。

5. 電晶體等效電路可分為下列幾種：

- (1). T 參數等效電路。
- (2). Z 參數(阻抗)等效電路：又稱為開路參數等效電路。
- (3). Y 參數(導納)等效電路：又稱為短路參數等效電路。
- (4). h 參數(混合)等效電路。

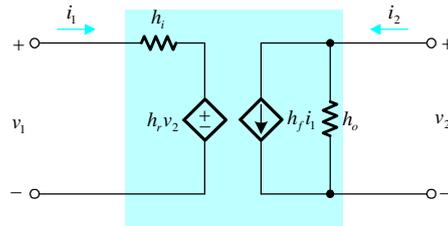


圖(6-2-1)

6. h 參數(混合)等效電路：輸入端以戴維寧等效電路表示，即輸入端採 Z 參數型態。輸出端以諾頓等效電路表示之，即輸出端採用 Y 參數。

(1). 圖(6-2-2)中所示雙埠裝置， v_1, v_2, i_1, i_2 等 4 個變數，其中令 i_1, v_2 為自變數， v_1, i_2 為應變數，因此可列出方程式如下：

$$\begin{aligned} v_1 &= h_{11}i_1 + h_{12}v_2 \\ i_2 &= h_{21}i_1 + h_{22}v_2 \end{aligned}$$



圖(6-2-2)

(2). 依兩方程式關係可求出每一個 h 參數定義為：

A. 令輸出電路短路，即令 $v_2 = 0$ 則

(A). 輸入阻抗(單位：歐姆 Ω)

$$h_{11} = \frac{v_1}{i_1}$$

(B). 順向電流增益(無單位)

$$h_{21} = \frac{i_2}{i_1}$$

B. 令輸入電路開路，即令 $i_1 = 0$ 則

(A). 逆向電壓增益(無單位)

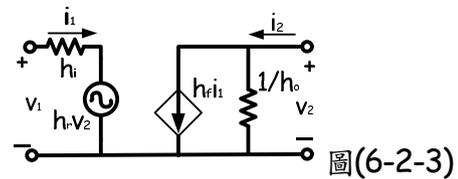
$$h_{12} = \frac{v_1}{v_2}$$

(B). 輸出導納(單位：姆歐 S)

$$h_{22} = \frac{i_2}{v_2}$$

7. 為便於表示，參數表示法採用美國電機工程學會之註腳方式：即

- $h_i = h_{11} \Rightarrow$ 輸入(input)阻抗
- $h_r = h_{12} \Rightarrow$ 逆向(reverse)電壓增益
- $h_f = h_{21} \Rightarrow$ 順向(forward)電流增益
- $h_o = h_{22} \Rightarrow$ 輸出(output)導納



圖(6-2-3)

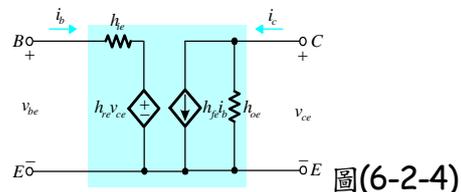
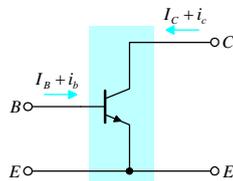
8. 若再加上註腳 e, c, b 即可表示電晶體三種放大組態之 h 參數

9. 電晶體三種放大器組態 h 參數分析：

(1). CE 組態如圖(6-2-4)

輸入.輸出方程式：

$$\begin{aligned} v_{be} &= h_{ie}i_b + h_{re}v_{ce} \\ i_c &= h_{fe}i_b + h_{oe}v_{ce} \end{aligned}$$



圖(6-2-4)

各參數之定義：

$$h_{ie} = \left. \frac{v_{be}}{i_b} \right|_{v_{ce} = 0}$$

$$h_{fe} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce} = 0}$$

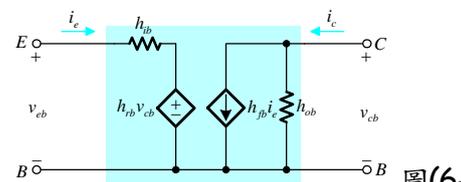
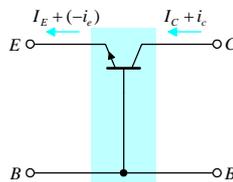
$$h_{re} = \left. \frac{v_{be}}{v_{ce}} \right|_{i_b = 0}$$

$$h_{oe} = \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b = 0}$$

(2). CB 組態如圖(6-2-5)

輸入.輸出方程式：

$$\begin{aligned} v_{eb} &= h_{ib}i_e + h_{rb}v_{cb} \\ i_c &= h_{fb}i_e + h_{ob}v_{cb} \end{aligned}$$



圖(6-2-5)

各參數之定義：

$$h_{ib} = \left. \frac{v_{eb}}{i_e} \right|_{v_{cb} = 0}$$

$$h_{fb} = \left. \frac{i_c}{i_e} \right|_{v_{cb} = 0}$$

$$h_{ob} = \left. \frac{v_{eb}}{v_{cb}} \right|_{i_e = 0}$$

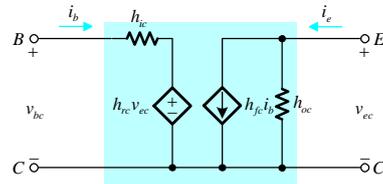
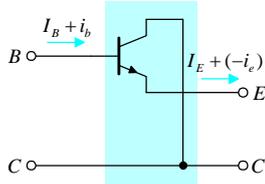
$$h_{ob} = \left. \frac{i_c}{v_{cb}} \right|_{i_e = 0}$$

(3).CC 組態如圖(6-2-6)

輸入,輸出方程式：

$$v_{be} = h_{ic}i_b + h_{rc}v_{ec}$$

$$i_e = h_{fc}i_b + h_{oc}v_{ec}$$



圖(6-2-6)

各參數之定義：

$$h_{ic} = \left. \frac{v_{bc}}{i_b} \right|_{v_{ec} = 0}$$

$$h_{fc} = \left. \frac{i_e}{i_b} \right|_{v_{ec} = 0}$$

$$h_{rc} = \left. \frac{v_{bc}}{v_{ec}} \right|_{i_b = 0}$$

$$h_{oc} = \left. \frac{i_e}{v_{ec}} \right|_{i_b = 0}$$

10.h 參數之互換公式：通常電晶體的製造商只提供一種組態，因此將此電晶體用於其他組態的工作時，就必須轉換。

(1).CE 組態等效電路參數轉換成 CB 組態等效電路參數(將 CE 組態之參數除以 1+h_{fe} 即為 CB 組態參數)

$$h_{ib} = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$$

$$h_{fb} = -\frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}}$$

$$h_{ob} = \frac{h_{oe}}{1 + h_{fe}}$$

$$h_{rb} = \frac{h_{fe}h_{oe}}{1 + h_{fe}} - h_{re}$$

(2).CE 組態等效電路參數轉換成 CC 組態等效電路參數。

$$h_{ic} = h_{ie}$$

$$h_{oc} = h_{oe}$$

$$h_{fc} = -(1 + h_{fe})$$

$$h_{rc} = 1 - h_{re}$$

(3).CC 組態等效電路參數轉換成 CB 組態等效電路參數：以 CE 組態為轉換媒介，即

CC → CE → CB

CB → CE → CC

11.h 參數的變化：電晶體會受到工作點，工作溫度，頻率，電壓，電流的影響。

(1).V_{CE} 變動時，h_{oe} 及 h_{re} 較 h_{ie} 及 h_{fe} 為靈敏。

(2).溫度變動時，h 參數會隨著變大，其中 h_{oe} 影響最小，h_{ie} 改變最快。

12.電晶體之三種組態的典型 h 參數值如表所示：

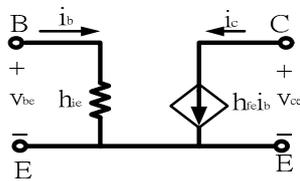
參數	共射(CE)組態	共集(CC)組態	共基(CB)組態
h _i	1kΩ	1kΩ	20Ω
h _r	2.5×10 ⁻⁴	≐1	3.0×10 ⁻⁴
h _f	50	-50	-0.98
h _o	25uA/V	25uA/V	0.5uA/V
1/h _o	40kΩ	40kΩ	2MΩ

13.BJT 簡化後的 h 參數等效電路：(混合 π 型小信號模型)

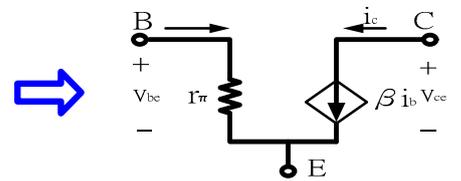
(1).BJT 的 CE 組態 h 參數：

$$\text{其中 } h_{re} \doteq 0, h_{oe} \doteq 0 \rightarrow \frac{1}{h_{oe}} = \infty,$$

故可將圖(6-2-4) h 參數等效電路簡化為圖(6-2-7)。



圖(6-2-7)



圖(6-2-8)

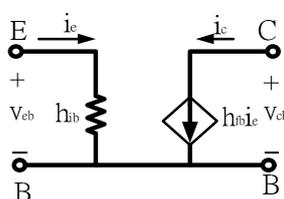
(2).其中 h_{ie} = r_π = 25mV / I_B

$$h_{fe} = \beta$$

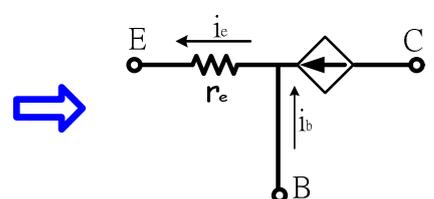
14.BJT 簡化後的 T 型小信號模型圖(6-2-10)：(適合 CB 組態)

(1). h_{ib} = r_e = 25mV / I_E、h_{fb} = α。

(2). r_π = r_e(1+β)。



圖(6-2-9)



圖(6-2-10)

※6-3 基本放大電路分析

1. 電晶體放大電路作小訊號分析之基本法則：

(1). 直流偏壓分析求 I_B 或 I_E 。

(2). 利用公式求 $r_{\pi} = \frac{25mV}{I_B}$ 、 $r_e = \frac{25mV}{I_E}$ 。

(3). 繪小訊號等效電路混合 π 模型或 T 型模型。

A. 將電晶體以等效電路取代，畫出完整的交流小訊號等效電路。

B. 將電路中之直流電壓源短路，電流源斷(開)路。

C. 將電路中之電容器短路，電感器斷(開)路。

(4). 依各參數之定義求出各項阻抗及增益。

2. 簡化的 h 參數等效電路(近似解)：當滿足 $h_{oe}R_L \leq 0.1$ 之簡化條件時，即可省略 h_o 及 h_r 兩參數作近似分析。

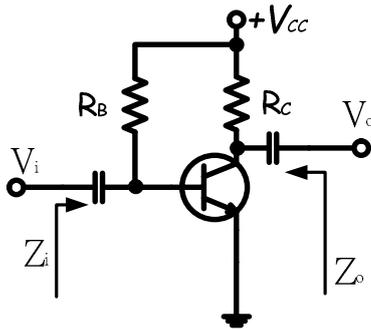
(1). 共射極放大電路中若 $h_{oe}R_C \leq 0.1$ 時，可將 h_{oe} 略去不計。

(2). 若 h_{oe} 被忽略，則由輸出等效電路可知， $I_c = h_{fe} I_b$ ； $h_{re} V_{CE} = h_{re} I_c R_L = h_{re} h_{fe} I_b R_L$ ，因此從典型參數值中可知 $h_{fe} h_{re} = 2.5 \times 10^{-4} \times 50 = 0.0125$ ，極小，只要 R_L 值不很大則 $I_b h_{fe} \gg h_{re} V_{CE}$ ，亦可將 h_{re} 省略

3. 各種放大器的小訊號分析近似解：

(1). 共射極放大電路

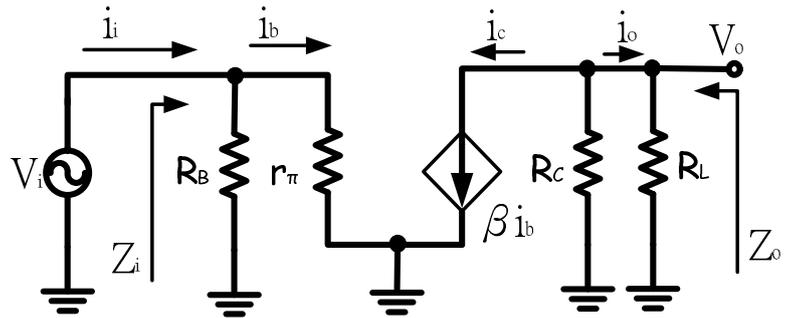
A. 固定偏壓法



圖(6-2-11)

無負載 R_L

- (A). 輸入阻抗： $Z_i = R_B // r_{\pi}$
- (B). 輸出阻抗： $Z_o = R_C$
- (C). 電流增益：
- $$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_b}{i_i} \times \frac{i_c}{i_b} \times \frac{i_o}{i_c} = \frac{R_B}{R_B + r_{\pi}} \times \beta \times (-1)$$
- (D). 電壓增益：
- $$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o \times Z_o}{i_i \times Z_i} = \frac{i_o}{i_i} \times \frac{Z_o}{Z_i} = \boxed{A_i \times \frac{Z_o}{Z_i}}$$
- $$= \frac{-i_c \times R_C}{i_b \times r_{\pi}} = -\frac{i_c}{i_b} \times \frac{R_C}{r_{\pi}} = \boxed{-\beta \times \frac{R_C}{r_{\pi}}}$$
- (E). 功率增益： $A_p = A_v \times A_i$



圖(6-2-12)

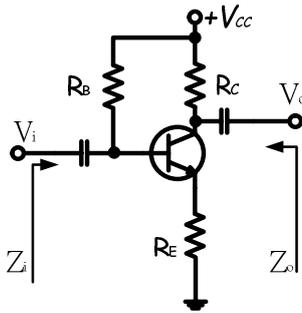
有負載 R_L

- (A). 輸入阻抗： $Z_i = R_B // r_{\pi}$
- (B). 輸出阻抗： $Z_o = R_C // R_L$
- (C). 電流增益： $A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_b}{i_i} \times \frac{i_c}{i_b} \times \frac{i_o}{i_c} = \frac{R_B}{R_B + r_{\pi}} \times \beta \times \left(-\frac{R_C}{R_C + R_L}\right)$
- (D). 電壓增益： $A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o \times Z_o}{i_i \times Z_i} = \frac{i_o}{i_i} \times \frac{R_L}{Z_i} = \boxed{A_i \times \frac{R_L}{Z_i}}$
- $$= \frac{-i_c \times (R_C // R_L)}{i_b \times r_{\pi}} = -\frac{i_c}{i_b} \times \frac{R_C // R_L}{r_{\pi}} = \boxed{-\beta \times \frac{R_C // R_L}{r_{\pi}}}$$
- (E). 功率增益： $A_p = A_v \times A_i$

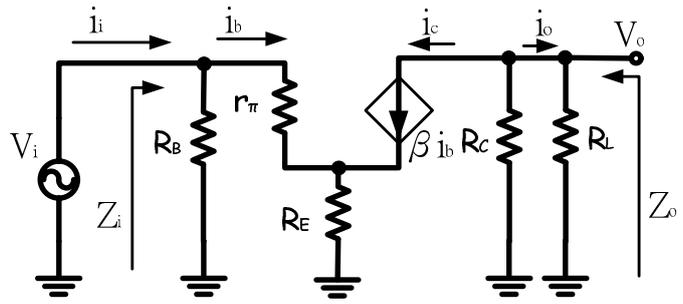
B. 射極回授偏壓法(含 R_E 電阻)：

(A). 若 R_E 阻抗旁有 C_E 旁路電容存在時，其交流分析與固定偏壓相同。

(B). 若 R_E 阻抗旁沒有 C_E 旁路電容存在時，如圖(6-2-13)，則其交流分析如下：



圖(6-2-13)



圖(6-2-14)

無負載 R_L

(A). 輸入阻抗: $Z_i = R_B // (r_{\pi} + (1 + \beta)R_E)$

(B). 輸出阻抗: $Z_o = R_C$

(C). 電流增益: $A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_b}{i_i} \times \frac{i_c}{i_b} \times \frac{i_o}{i_c} = \frac{R_B}{R_B + (r_{\pi} + (1 + \beta)R_E)} \times \beta \times (-1)$

(D). 電壓增益: $A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o \times Z_o}{i_i \times Z_i} = \frac{i_o}{i_i} \times \frac{Z_o}{Z_i} = A_i \times \frac{Z_o}{Z_i} = \frac{-i_c \times R_C}{i_b \times r_{\pi}} = -\frac{i_c}{i_b} \times \frac{R_C}{r_{\pi}} = -\beta \times \frac{R_C}{r_{\pi}}$

(E). 功率增益: $A_p = A_v \times A_i$

有負載 R_L

(A). 輸入阻抗: $Z_i = R_B // (r_{\pi} + (1 + \beta)R_E)$

(B). 輸出阻抗: $Z_o = R_C // R_L$

(C). 電流增益: $A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_b}{i_i} \times \frac{i_c}{i_b} \times \frac{i_o}{i_c} = \frac{R_B}{R_B + (r_{\pi} + (1 + \beta)R_E)} \times \beta \times (-\frac{R_C}{R_C + R_L})$

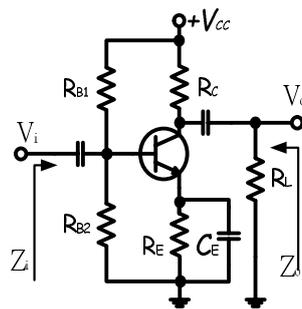
(D). 電壓增益: $A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o \times Z_o}{i_i \times Z_i} = \frac{i_o}{i_i} \times \frac{R_L}{Z_i} = A_i \times \frac{R_L}{Z_i} = \frac{-i_c \times (R_C // R_L)}{i_b \times r_{\pi}} = -\frac{i_c}{i_b} \times \frac{R_C // R_L}{r_{\pi}} = -\beta \times \frac{R_C // R_L}{r_{\pi}}$

(E). 功率增益: $A_p = A_v \times A_i$

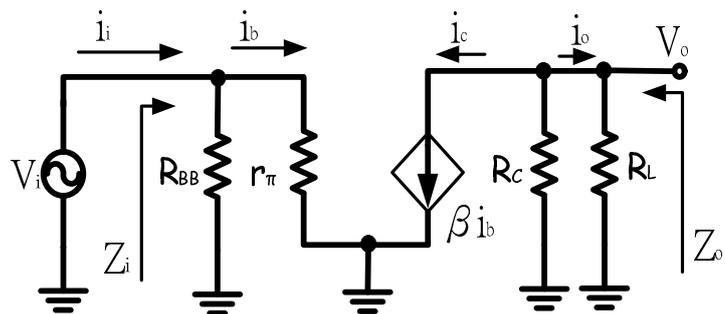
C. 分壓偏壓法

(A). 先將 R_{B1} 及 R_{B2} 合併, 即 $R_{BB} = R_{B1} // R_{B2}$ 。

(B). 依射極回授偏壓法(含 R_E 電阻)之交流分析:



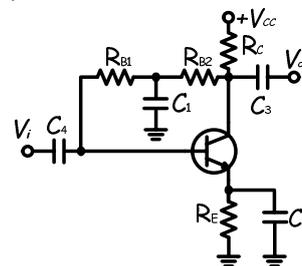
圖(6-2-15)



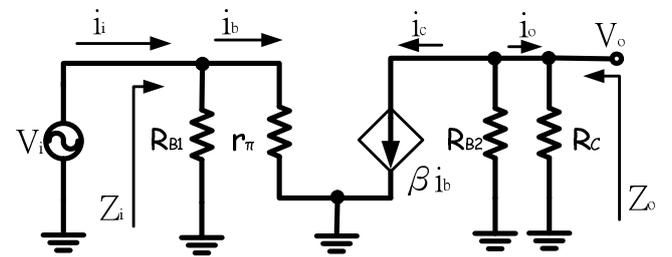
(6-2-16)

D. 集極回授偏壓法:

(A). 交流分析技巧與分壓偏壓法相同。

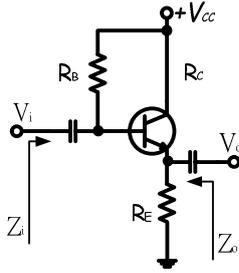


圖(6-2-17)

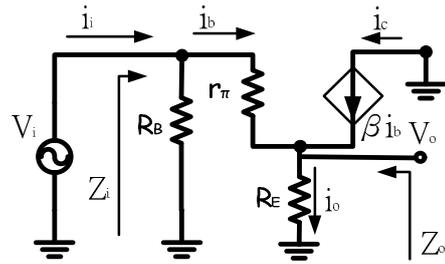


圖(6-2-18)

(2).共集極偏壓法



圖(6-2-19)



圖(6-2-20)

A. 輸入阻抗： $Z_i = R_B // (r_{\pi} + (1 + \beta)R_E)$

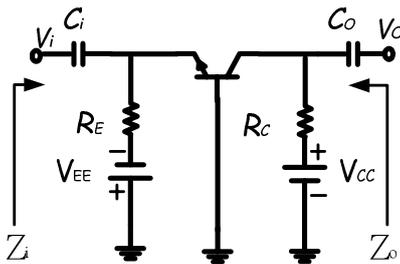
B. 輸出阻抗： $Z_o = R_E // \frac{r_{\pi}}{1 + \beta} = R_E // r_e \doteq r_e$

C. 電流增益： $A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_b}{i_i} \times \frac{i_e}{i_b} \times \frac{i_o}{i_e} = \frac{R_B}{R_B + (r_{\pi} + (1 + \beta)R_E)} \times (1 + \beta) \times 1 = \frac{R_B}{R_B + (r_{\pi} + (1 + \beta)R_E)} \times (1 + \beta)$

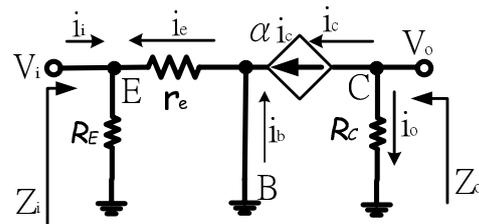
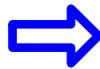
D. 電壓增益： $A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o \times Z_o}{i_i \times Z_i} = \frac{i_o}{i_i} \times \frac{R_E}{Z_i} = \boxed{A_i \times \frac{R_E}{Z_i}} = \frac{i_e \times R_E}{i_b \times (r_{\pi} + (1 + \beta)R_E)} = \frac{i_b \times (1 + \beta) \times R_E}{i_b \times (r_{\pi} + (1 + \beta)R_E)} \doteq 1$

E. 功率增益： $A_p = A_v \times A_i$

(3).共基極偏壓法



圖(6-2-21)



圖(6-2-22)

A. 輸入阻抗： $Z_i = R_E // r_e \doteq r_e$

B. 輸出阻抗： $Z_o = R_C$

C. 電流增益： $A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_e}{i_i} \times \frac{i_c}{i_e} \times \frac{i_o}{i_c} = (-\frac{R_E}{R_E + r_e}) \times \alpha \times (-1) \doteq \alpha \leq 1$

D. 電壓增益： $A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o \times Z_o}{i_i \times Z_i} = \frac{i_o}{i_i} \times \frac{R_C}{Z_i} = \boxed{A_i \times \frac{R_C}{Z_i}} = \frac{i_c \times R_C}{i_e \times r_e} = \alpha \times \frac{R_C}{r_e} \doteq \frac{R_C}{r_e}$

E. 功率增益： $A_p = A_v \times A_i$



挫折來自你的放棄，

不想放棄就要面對挫折

