

實 習 十

雙載子接面電體交流小訊號放大電路 (二)

--共集極與共基極放大器

◆ 實習目的

1. 藉由實習過程，以瞭解**共集極**與**共基極**放大器之電壓放大、電流放大與功率放大等交流小訊號原理與測量方法。
2. 藉由實習過程，以瞭解共集極與共基極放大器的**交流小訊號特性**之差異。

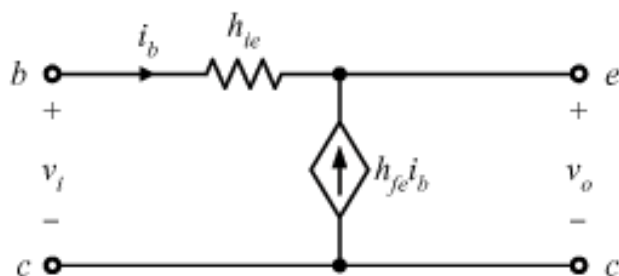


相 關 知 識

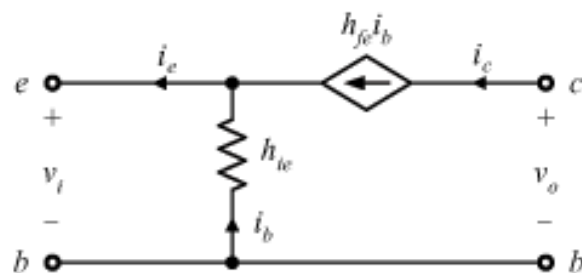
- ◆ **共射極** (CE) 放大器具有相當大的電壓 (負值) 電流增益 (負值) 與中等之輸入、輸出阻抗，故此種放大器較適合用來作電子電路之**中級放大器**之用
- ◆ **共集極** (CC) 放大器之交流小訊號特性，具高輸入阻抗、低輸出阻抗、高電流增益與接近 1 之電壓增益 (正值)，故此種放大器較適合作電子電路**後級緩衝器**之用
- ◆ **共基極** (CB) 放大器之交流小訊號特性，恰好與共集極放大器互為對偶，即具低輸入阻抗、高輸出阻抗、高電壓增益 (正值) 與小於 1 之電流增益 (正值)，因此適合作電子電路**前級緩衝器**之用。



- ◆ **共射極 (CE) 組態** 為 BJT 最常用之電路組態，所以製造商大部份僅提供共射極電路組態之 h 參數，往往在對其它兩種電路組態進行小訊號分析時，仍採用共射極電路組態之 h 參數為多。
- ◆ 為了方便起見，可依共集極與共基極電路組態之輸入與輸出接腳，分別**對應**至共射極組態，即可繪出利用共射極組態之 h 參數，以顯示出其它兩種 BJT 電路組態之**混合 h 參數小訊號模型**，分別如下圖所示。



(a) **共集極**組態之簡化混合 h 參數小訊號模型



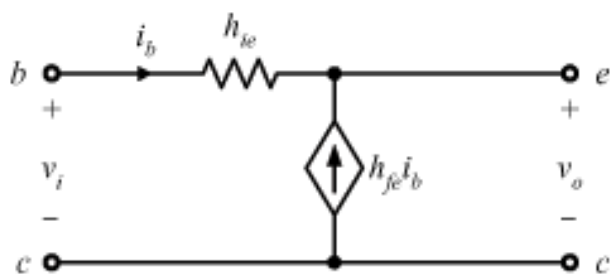
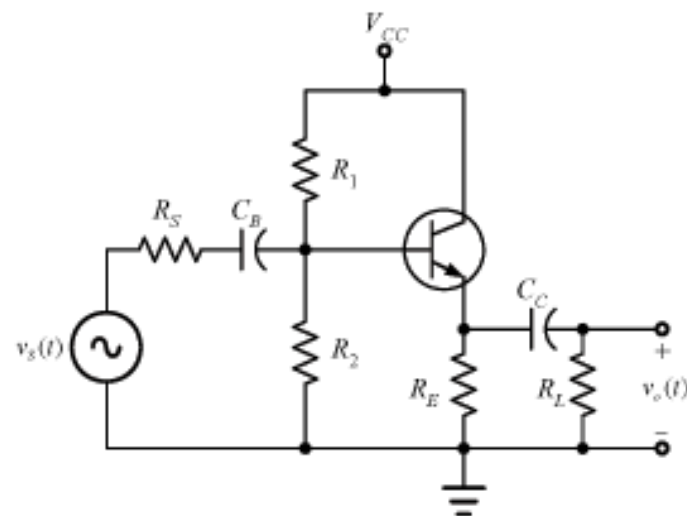
(b) **共基極**組態之簡化混合 h 參數小訊號模型

- ◆ 接著分 2 個部份，以分析**共集極 (CC)** 與**共基極 (CB)** 放大器之交流小訊號特性。



共集極 (CC) 組態放大器之小訊號分析

- ◆ 若將交流輸入訊號 $v_s(t)$ 經由耦合電容進入電晶體之基極，而輸出訊號是由射極取出(不是由集極取出)，即可組成共集極 (CC) 放大器，如右圖所示。
- ◆ 因共集極(CC)放大器之輸出是由射極取出，導致具有高輸入阻抗、低輸出阻抗與正值(略小於 1)電壓增益之特性，因此亦稱為電壓隨耦器 (Emitter follower)，此種放大電路主要應用於後級阻抗匹配用之緩衝器 (Buffer)。
- ◆ 為簡化計算之複雜度，將改用右圖的共集極組態之簡化混合 h 參數小訊號模型來取代電晶體，以進行交流小訊號分析。



◆ 首先將所有之耦合電容**短路**與直流電源**接地**後，再以簡化混合 h 參數小訊號模型來代替**電晶體**後，便可得到右下圖之**小訊號等效電路**，便可利用右下圖之**等效電路**來分析放大器之**交流特性**，包括 A_i 、 A_v 、 Z_i 與 Z_o 如下：

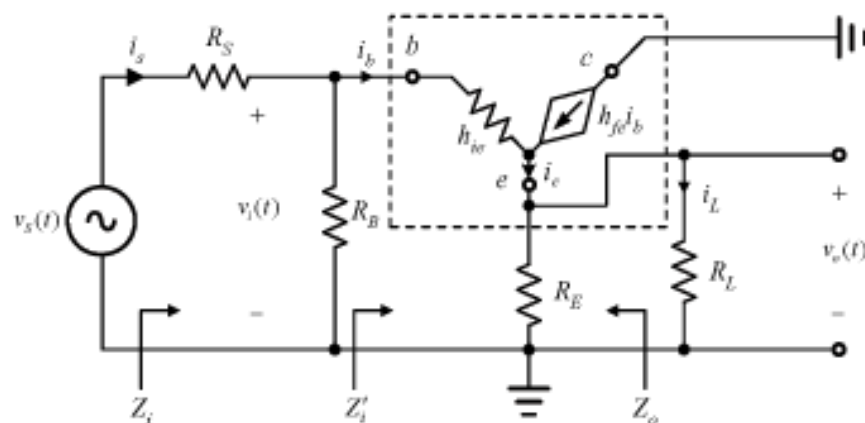
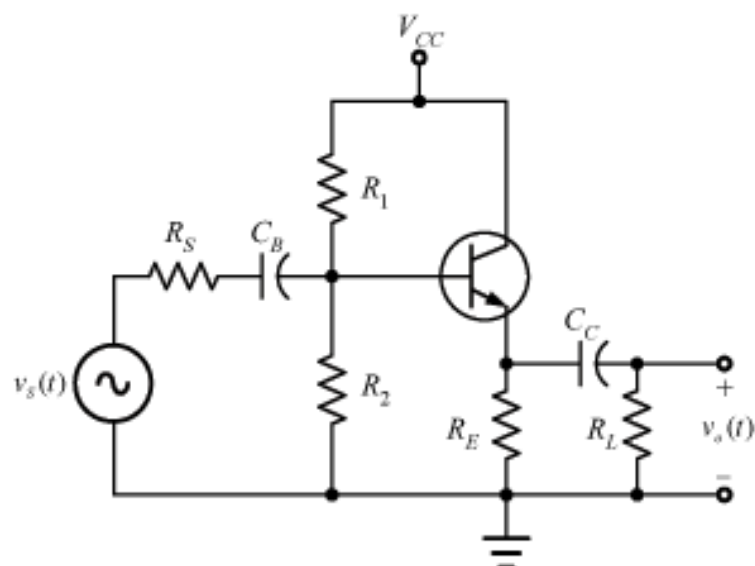
(a) **電流增益** A_i ：由右圖之**輸出迴路**可得

$$i_L = \frac{v_o}{R_L} = \frac{(1 + h_{fe}) \cdot i_b \cdot (R_E \parallel R_L)}{R_L}$$

利用右圖可得共集極放大器之**電流增益** A_i 為

$$A_i = \frac{i_L}{i_s} = \frac{i_L}{i_b} \cdot \frac{i_b}{i_s} = \frac{(1 + h_{fe}) \cdot (R_E \parallel R_L)}{R_L} \cdot \frac{R_B}{R_B + R_i}$$

其中 $R_i = h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot (R_E \parallel R_L)$ 。



(b) **電壓增益** A_v : 由右圖之**輸入迴路**可得

$$v_i = i_b \cdot [h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot (R_E \parallel R_L)]$$

再由右圖之**輸出迴路**可得

$$v_o = (1 + h_{fe}) \cdot (R_E \parallel R_L) \cdot i_b$$

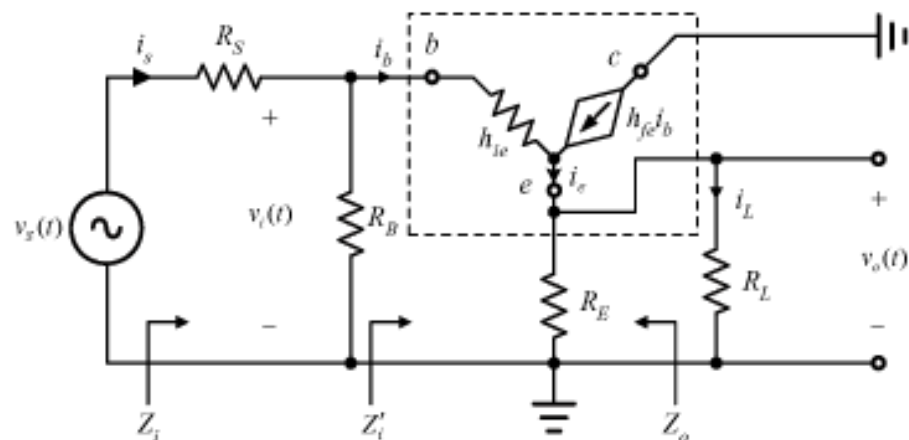
整理上兩式可得 A'_v 為

$$A'_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{(1 + h_{fe}) \cdot (R_E \parallel R_L)}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot (R_E \parallel R_L)}$$

註 : $(1 + h_{fe}) \cdot (R_E \parallel R_L) \gg h_{ie}$ 皆會成立，因此**共集極放大器**之 A'_v 非常**接近於** 1(永遠小於 1)之**正值**，
且輸出電壓**極性**與輸入訊號相同。

觀察上圖可得共集極放大器之**電壓增益** $A_v = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{v_i}{v_s} = A'_v \cdot \frac{R'_i}{R_s + R'_i}$

其中 $R'_i = R_B \parallel R_i = R_B \parallel [h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot (R_E \parallel R_L)]$ 。



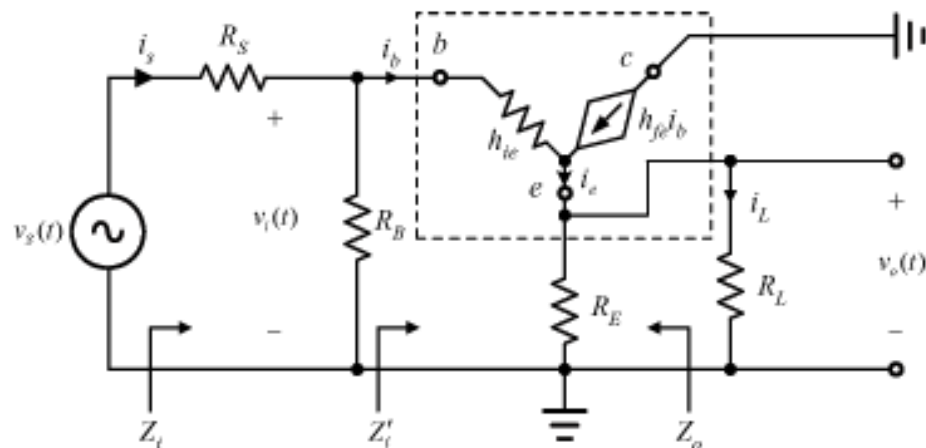
(c) **輸入阻抗** Z_i : 由右圖之**輸入迴路**可得

$$v_i = [h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R'_L] \cdot i_b$$

其中 $R'_L = R_E \parallel R_L$ 。

整理上式可得 Z'_i 為

$$Z'_i = \frac{v_i}{i_b} = h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R'_L$$



註：共集極放大器之 Z'_i 與 R'_L 大小成**正比**；欲**提高**此種放大器之輸入阻抗，可由**增加** R_E 來完成，但**增加** R_E 會使放大器之**增益明顯的降低**。

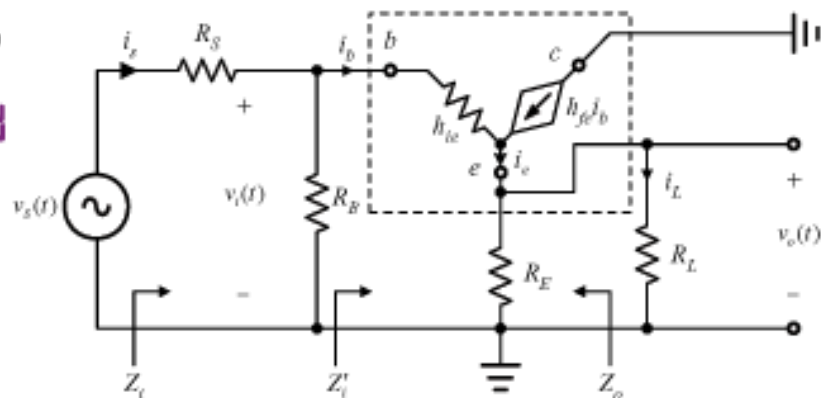
利用上圖之**輸入迴路**，可得共集極放大器之**輸入阻抗** Z_i 為

$$Z_i = R_B \parallel Z'_i = \frac{R_B \cdot [h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R'_L]}{R_B + h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R'_L}$$



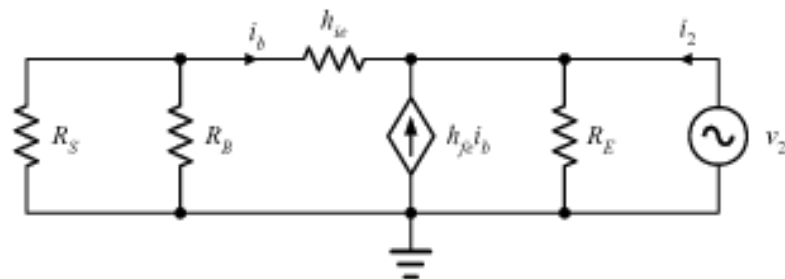
- (d) **輸出阻抗** Z_o : 根據定義可知, 令 $v_s = 0$, **移去負載** R_L , 並在**輸出端加上一電壓** V_2 , 即求得出放大器之**輸出阻抗** Z_o 為

$$Z_o = \frac{v_2}{i_2} \Big|_{v_s = 0, R_L \rightarrow \infty}$$



由上式之**定義**, 重繪等效電路如右下圖所示。由右下圖可得**電流** i_b 與 i_2 分別為

$$i_b = \frac{-v_2}{(R_s \parallel R_B) + h_{ie}}$$



$$i_2 = \frac{v_2}{R_E} - i_b - h_{fe} \cdot i_b = \frac{v_2}{R_E} - (1 + h_{fe}) \cdot i_b = \frac{v_2}{R_E} + v_2 \cdot \left[\frac{1 + h_{fe}}{h_{ie} + (R_s \parallel R_B)} \right]$$

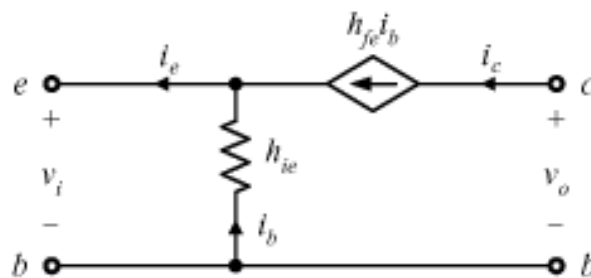
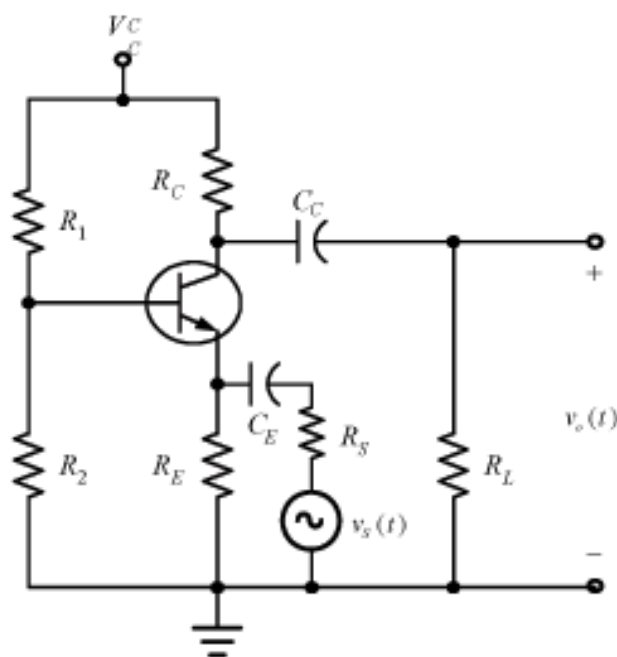
整理上式可得放大器之**輸出阻抗** $Z_o = \frac{v_2}{i_2} = \frac{R_E \cdot [h_{ie} + (R_s \parallel R_B)]}{[h_{ie} + (R_s \parallel R_B)] + (1 + h_{fe}) \cdot R_E}$ 。

$$\rightarrow Z_o = \frac{v_2}{i_2} = \frac{h_{ie} + (R_s \parallel R_B)}{(1 + h_{fe})} \quad \text{若 } (1 + h_{fe}) \cdot R_E \gg [h_{ie} + (R_s \parallel R_B)] \text{ 成立。}$$



共基極 (CB) 組態放大器之小訊號分析

- ◆ 若將交流輸入訊號 v_s 經由耦合電容進入電晶體之射極，而輸出訊號則由集極取出，即可組成共基極(CB)放大器，如右圖所示。
- ◆ 共基極放大電路具有高電壓增益、極低電流增益、低功率增益、低輸入阻抗與高輸出阻抗之交流特性，故共基極組態之電晶體放大器是最少被使用的，只有應用於部份之高頻電路上。
- ◆ 為簡化計算之複雜度，將改用下圖的共基極組態之簡化混合 h 參數小訊號模型來取代電晶體，以進行交流小訊號分析。



- ◆ 首先將所有之耦合電容短路與直流電源接地後，再以共基極組態之簡化混合 h 參數小訊號模型來代替電晶體後，便可得右下圖之等效電路，便可利用右下圖之等效電路來分析放大器之交流小訊號特性，包括 A_i 、 A_v 、 Z_i 與 Z_o 如下：

(a) 電流增益 A_i ：由右下圖之輸入迴路可得

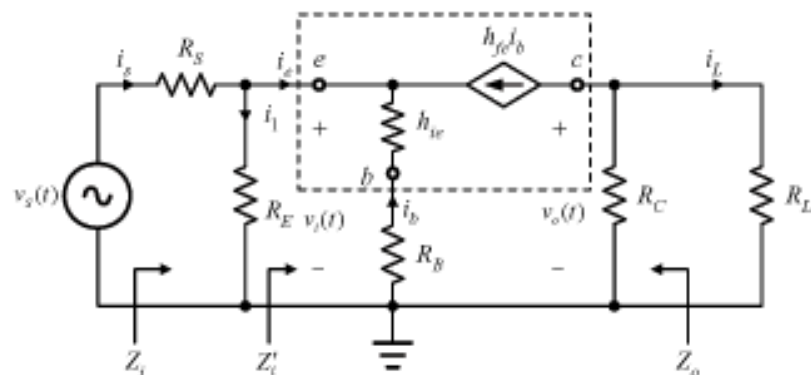
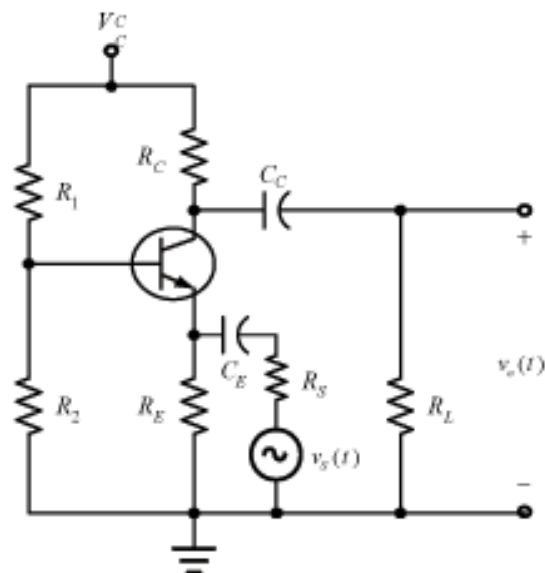
$$i_b = \frac{-v_i}{h_{ie} + R_B} \quad \text{與} \quad v_i = i_1 \cdot R_E = [i_s + (1 + h_{fe}) \cdot i_b] \cdot R_E$$

其中

$$i_1 = i_s - i_e = i_s - [-(1 + h_{fe}) \cdot i_b] = [i_s + (1 + h_{fe}) \cdot i_b]$$

整理上面兩式可得

$$i_b = \frac{-i_s \cdot R_E}{(1 + h_{fe}) \cdot R_E + (h_{ie} + R_B)}$$



利用右圖之輸出迴路可得

$$i_L = -h_{fe} \cdot i_b \cdot \frac{R_C}{R_C + R_L}$$

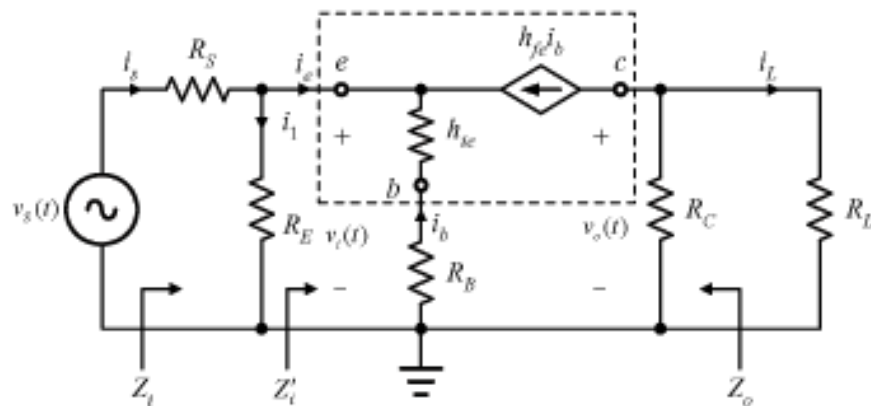
將 $i_b = \frac{-i_s \cdot R_E}{(1 + h_{fe}) \cdot R_E + (h_{ie} + R_B)}$ 式帶入上式可得

$$i_L = \frac{h_{fe} \cdot i_s \cdot R_E}{(1 + h_{fe}) \cdot R_E + (h_{ie} + R_B)} \cdot \frac{R_C}{R_C + R_L}$$

利用右圖可得電流增益 A_i 為

$$A_i = \frac{i_L}{i_s} = \frac{h_{fe} \cdot R_E \cdot R_C}{[(1 + h_{fe}) \cdot R_E + (h_{ie} + R_B)] \cdot (R_C + R_L)}$$

註：觀察上式可知，共基極組態放大器之電流增益小於 1。



(b) **電壓增益** A_v : 由右圖之輸出迴路可得

$$v_o = -h_{fe} \cdot i_b \cdot (R_C \parallel R_L)$$

將 $v_i = -i_b \cdot (R_B + h_{ie})$ 帶入上式，可得放大器之電

壓增益 A_v 為

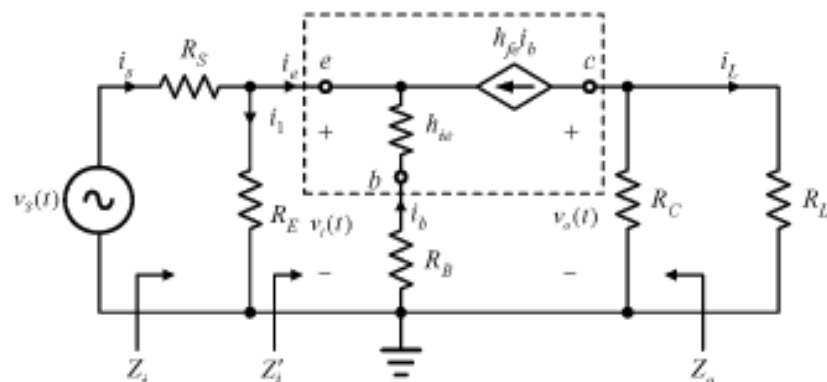
$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{v_i}{v_s} = \frac{h_{fe} \cdot (R_C \parallel R_L)}{h_{ie} + R_B} \cdot \frac{Z_i}{R_S + Z_i} \quad (\text{其中 } Z_i = \frac{v_i}{i_s} \text{ 為放大電路之輸入阻抗})$$

(c) **輸入阻抗** Z_i :

$$\text{將 } i_b = \frac{-v_i}{h_{ie} + R_B} \text{ 帶入 } v_i = i_1 \cdot R_E = [i_s + (1 + h_{fe}) \cdot i_b] \cdot R_E, \text{ 可得 } v_i = \left[i_s - \frac{v_i \cdot (1 + h_{fe})}{(h_{ie} + R_B)} \right] \cdot R_E$$

$$\text{整理上式可得放大器之輸入阻抗 } Z_i = \frac{v_i}{i_s} = \frac{R_E \cdot (h_{ie} + R_B)}{(h_{ie} + R_B) + (1 + h_{fe}) \cdot R_E}。$$

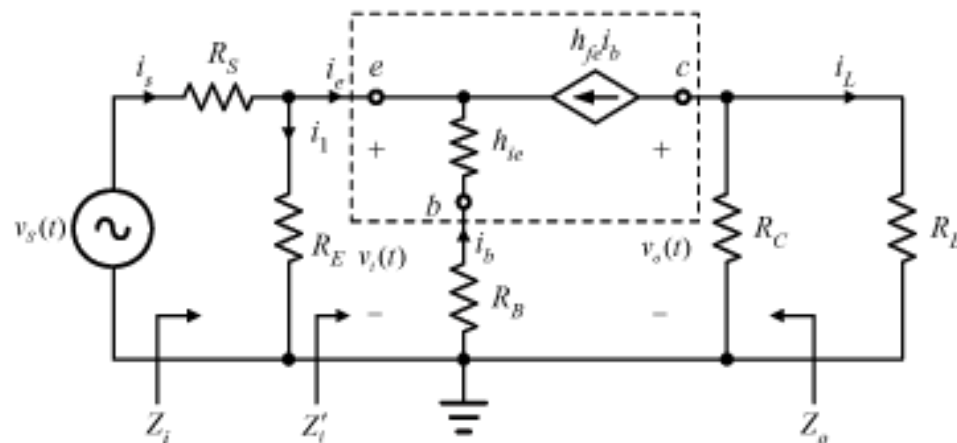
註：共基極放大器之輸入阻抗相當低，嚴重限制共基極組態放大器之用途。



(d) 輸出阻抗 Z_o :

觀察下圖之輸出迴路可知，相依電流源 $h_{fe} \cdot i_b$ 具有極高之阻抗，故放大器之輸出阻抗 Z_o 為

$$Z_o = R_C$$



三種放大器交流小訊號特性之比較

- ◆ 綜合以上之討論結果，摘錄**共射極** (CE)、**共集極** (CC) 與**共基極** (CB) 等三種不同電晶體組態放大器的**交流小訊號特性**於下表所示。

特 性 \ 電晶體組態	共射極組態 (CE)	共集極組態 (CC)	共基極組態 (CB)
電流增益 A_i	高	高	極低 (< 1)
電壓增益 A_v	高	低 (≈ 1)	高
功率增益 A_p	高	中	低
輸入阻抗 Z_i	中	高	低
輸出阻抗 Z_o	中	低	高
輸入與輸出相位	反相	同相	同相
主要之應用	中級放大器	後級阻抗匹配	前級阻抗匹配



實習步驟與結果

(一) 共集極放大器

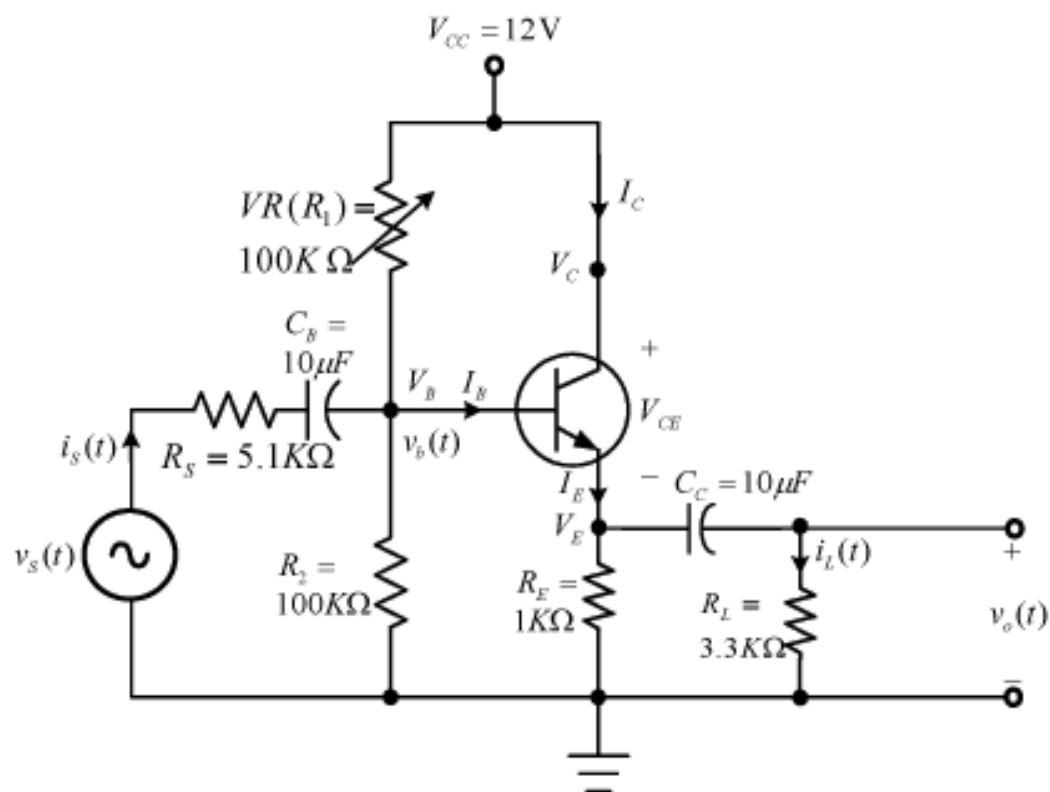


表 10-2 共集極放大器的直流電壓與電流

可變電阻 (VR) = 68.3K Ω

測 量 項 目	理 論 值	測 量 值
$I_C (mA)$	5.3	5.96
$I_B (\mu A)$	22.1	24.6
$I_E (mA)$	5.32	6.03
$V_B (V)$	6	6.58
$V_C (V)$	12	11.94
$V_E (V)$	5.32	5.96
$V_{CE} (V)$	6.68	6
$\beta = \frac{I_C}{I_B}$	240	242



表 10-3 共集極放大器的交流電壓波形

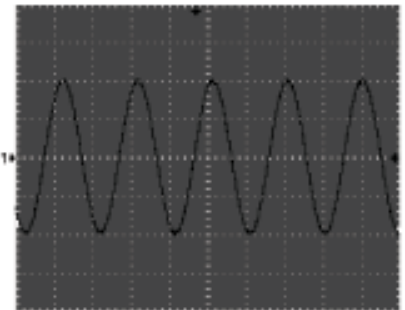
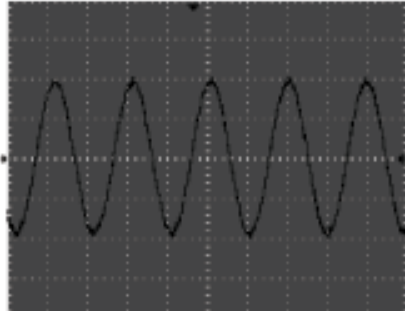
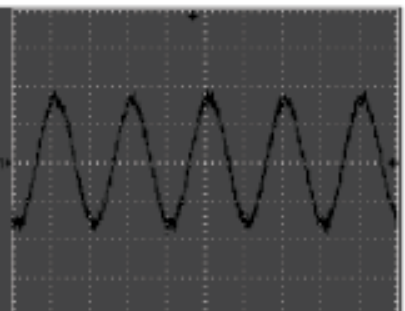
 <p>CH1 500mV M 500μs CH1 /</p>	<p><u>500m</u> Volts/DIV 峰值電壓： <u>1</u> V <u>500μ</u> Time/DIV 週期： <u>1m</u> sec 頻率： <u>1K</u> Hz</p>
 <p>CH1 500mV M 500μs CH1 /</p>	<p><u>500m</u> Volts/DIV 峰值電壓： <u>1</u> V <u>500μ</u> Time/DIV 週期： <u>1m</u> sec 頻率： <u>1K</u> Hz</p>
 <p>CH1 200mV M 500μs CH1 /</p>	<p><u>200m</u> Volts/DIV 峰值電壓： <u>0.38</u> V <u>500μ</u> Time/DIV 週期： <u>1m</u> sec 頻率： <u>1K</u> Hz</p>



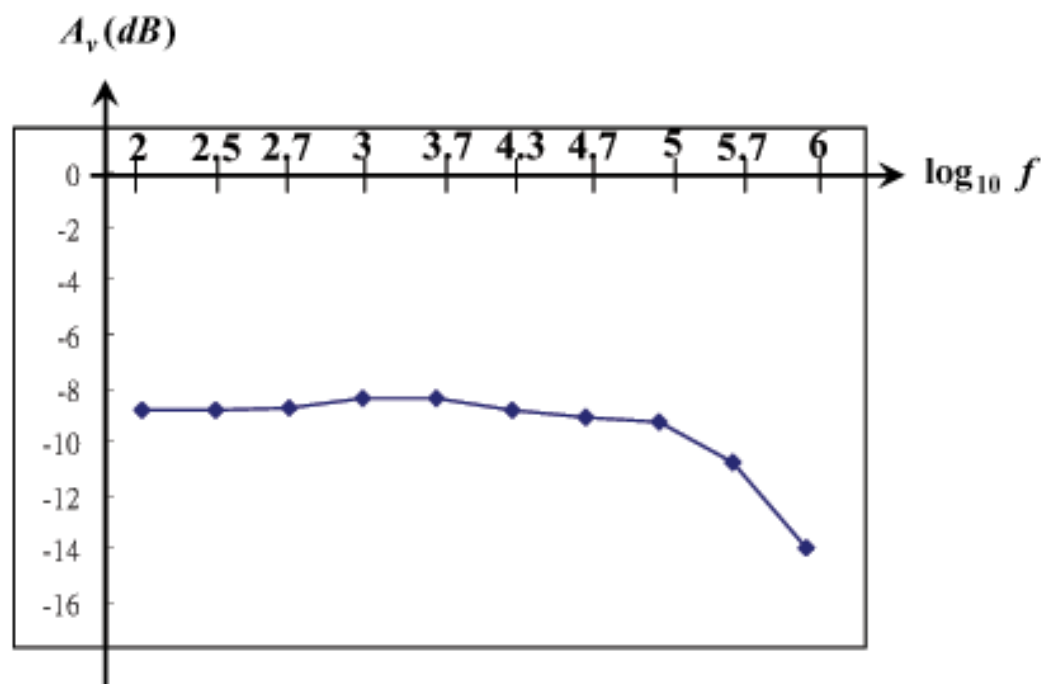
表 10-4 共集極放大器的電壓與電流增益

測 量 項 目	理 論 值	測 量 值
$i_s(t) = \frac{v_s(t) - v_b(t)}{R_S}$	$12.5 \mu A$	$9.8 \mu A$
$i_L(t) = \frac{v_o(t)}{R_L}$	$0.16 mA$	$0.12 mA$
$A_i = \frac{i_L(t)}{i_s(t)}$	12.8	12.24
$A_v = \frac{v_o(t)}{v_s(t)}$	0.42	0.38
$A_p = A_i \times A_v$	5.38	4.65



表 10-5 共集極放大器的電壓增益對頻率關係

頻率 f (Hz)	100	300	500	1K	5K	20K	50K	100K	500K	1M
$v_{s(p-p)}$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$v_{o(p-p)}$	0.72	0.72	0.73	0.76	0.76	0.72	0.7	0.69	0.58	0.4
$A_v = \frac{v_{o(p-p)}}{v_{s(p-p)}}$	0.36	0.36	0.37	0.38	0.38	0.36	0.35	0.35	0.29	0.2



(二) 共基極放大器

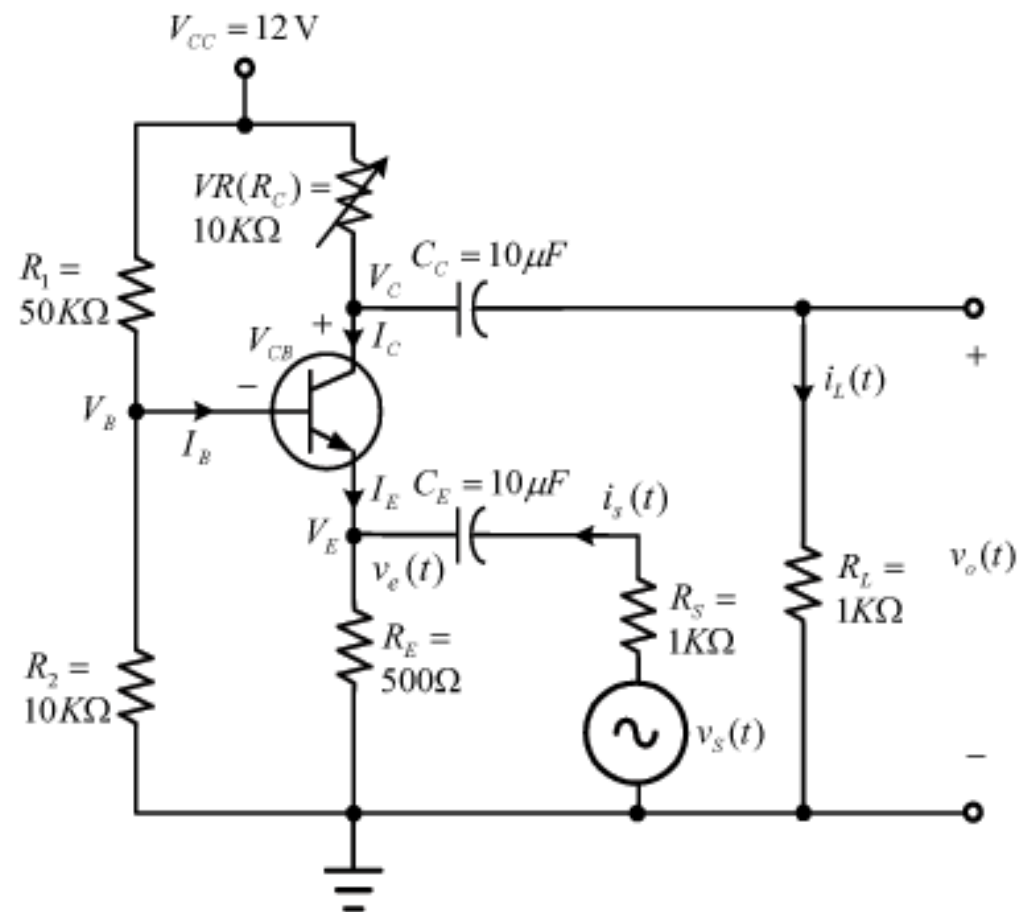


表 10-6 共基極放大器的直流電壓與電流

集極電阻 (V_R) = 1.95K Ω

測 量 項 目	理 論 值	測 量 值
I_C (mA)	2.49	2.4
I_B (μA)	10.4	10.3
I_E (mA)	2.5	2.44
V_B (V)	2	1.89
V_C (V)	7.13	7.29
V_E (V)	1.25	1.27
V_{CB} (V)	5.88	6
$\beta = \frac{I_C}{I_B}$	240	233



表 10-7 共基極放大器的交流電壓波形

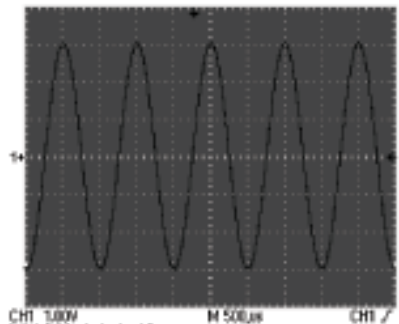
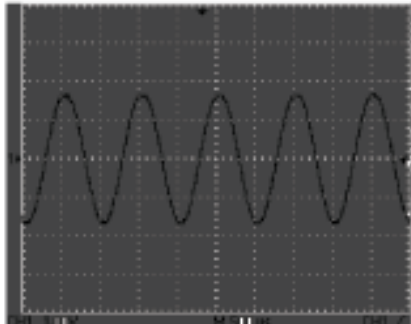
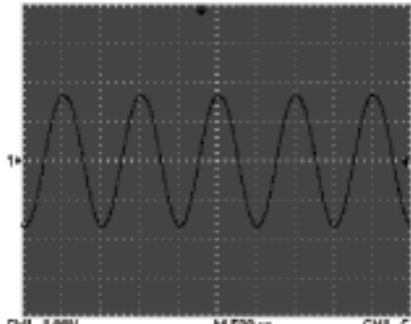
 <p>CH1 3.00V M 500.0us CH1 7</p>	<p><u>1</u> Volts/DIV 峰值電壓： <u>3</u> V <u>500μ</u> Time/DIV 週期： <u>1m</u> sec 頻率： <u>1K</u> Hz</p>
 <p>CH1 0.6V M 500.0us CH1 7</p>	<p><u>200m</u> Volts/DIV 峰值電壓： <u>0.6</u> V <u>500μ</u> Time/DIV 週期： <u>1m</u> sec 頻率： <u>1K</u> Hz</p>
 <p>CH1 1.00V M 500.0us CH1 7</p>	<p><u>500m</u> Volts/DIV 峰值電壓： <u>1.7</u> V <u>500μ</u> Time/DIV 週期： <u>1m</u> sec 頻率： <u>1K</u> Hz</p>



表 10-8 共基極放大器的電壓與電流增益

測 量 項 目	理 論 值	測 量 值
$i_s(t) = \frac{v_s(t) - v_e(t)}{R_S}$	$2.52mA$	$2.4mA$
$i_L(t) = \frac{v_o(t)}{R_L}$	$1.81mA$	$1.7mA$
$A_i = \frac{i_L(t)}{i_S(t)}$	0.72	0.71
$A_v = \frac{v_o(t)}{v_s(t)}$	0.57	0.6
$A_p = A_i \times A_v$	0.41	0.43



表 10-9 共基極放大器的電壓增益對頻率關係

頻率 f (Hz)	100	300	500	1K	5K	20K	50K	100K	500K	1M
$v_{s(p-p)}$	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
$v_{o(p-p)}$	3.31	3.35	3.38	3.4	3.43	3.44	3.4	3.38	2.64	1
$A_v = \frac{v_{o(p-p)}}{v_{s(p-p)}}$	0.55	0.56	0.56	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.44	0.16

