

實驗十一 BJT 電路(三) 放大器的頻率響應與差動放大器

11-1 前言:

在前幾章有關放大器的討論裏，我們在計算增益(如 A_V)時均簡化為常數，這意謂放大器的頻寬為無限大。當然，這與實際狀況不符。因此，在這章我們要討論放大器的電路裏有哪些元件會影響放大器的頻率響應，進而產生一個頻寬為有限值的放大器。另一方面，若觀察前幾章的放大器電路，我們發現若雜訊進入放大器，則雜訊也會被放大。此外，前幾章的放大器也不能放大低頻訊號。為了解決這兩個問題，本章將介紹差動放大器(differential amplifier)。

11-2 基本原理:

放大器的頻率響應

以圖 11-1 限制型(swamping) CE 放大器為例，計有 C_1 ， C_2 ， C_3 三個電容影響放大器低頻時的響應，以及 C_{be} ， C_{bc} 兩電容影響放大器高頻時的響應。茲將各電容之影響說明如下。

$\{J_{de}$ ：在 Datasheet 中以 h_{FE} 表示

$\{J_{ae}$ ：在 Datasheet 中以 h_{fe} 表示 ($\{J_{ae} \nrightarrow \{J_{de}$)

C_{be} ：在 Datasheet 中以 C_{ob} 表示

C_{bc} ：在 Datasheet 中以 C_{ib} 表示，若無則以 10pF 計算

(1) 輸入耦合電容 C_1

輸入耦合電容 C_1 將使輸入端形成一高通濾波器(如圖 13-2 所示)，其轉角頻率 $f_{cl(input)}$ 可表示為，

$$f_{cl(input)} = \frac{1}{2\pi R_{in} C_1},$$

$$R_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_{in(base)}$$

$$= R_1 \parallel R_2 \parallel \beta_{ac} (R_{E1} + r_e').$$

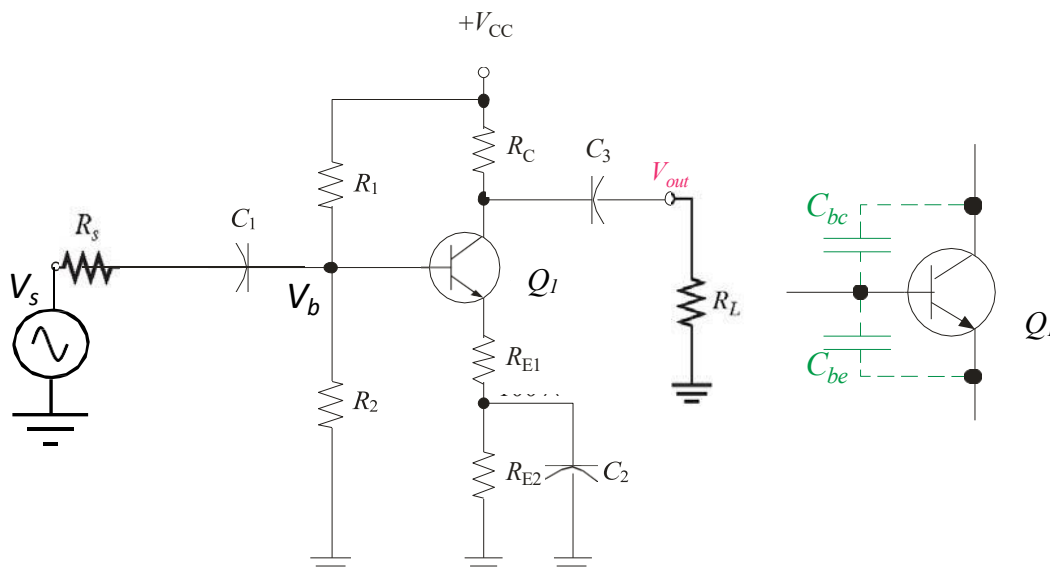


圖 11-1 限制型(swamping) CE 放大器及其電晶體之內電容示意圖。

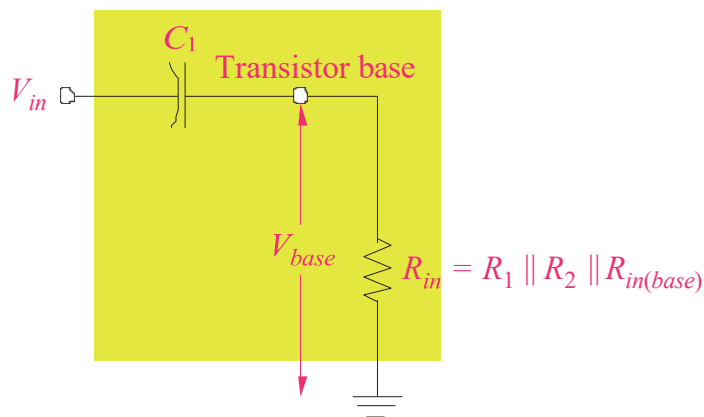


圖 11-2 輸入耦合電容 C_1 產生之高通濾波器。

(2) 輸出耦合電容 C_3

輸出耦合電容 C_3 將使輸出端形成一高通濾波器(如圖 11-3 所示)，其轉角頻率 $f_{cl(output)}$ 可表示為，

$$f_{cl(output)} = \frac{1}{2\pi(R_C + R_L)C_3}$$

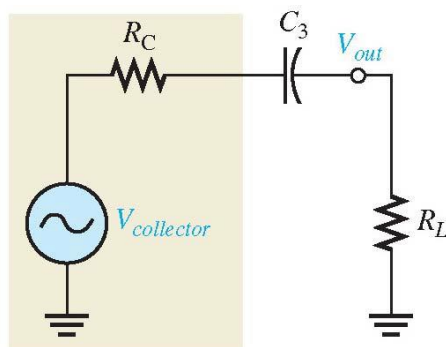


圖 11-3 輸出耦合電容 C_3 產生之高通濾波器。

(3) 旁路(bypass)電容 C_2

旁路電容 C_2 在高頻時如同短路，只有在低頻時影響放大器的響應(如圖 11-4 所示)，其轉角頻率 $f_{cl(bypass)}$ 可表示為，

$$f_{cl(bypass)} = \frac{1}{2\pi(R_{equiv})C_2},$$

$$R_{equiv} = R_{E2} \parallel \left\{ \frac{R_1 \parallel R_2 \parallel R_s}{\beta_{ac}} + r_e' + R_{E1} \right\}$$

R_{equiv}

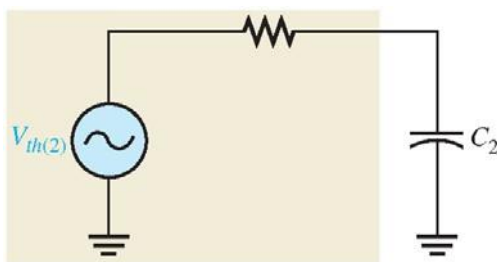


圖 11-4 旁路電容 C_2 在低頻時對放大器的影響示意圖，其中 R_{equiv} 與 $V_{th(2)}$ 分別為戴維寧等效電路分析產生的電阻與電壓。

(4) 內電容 C_{be} 與 C_{bc} 對放大器高頻響應的影響

利用米勒定理(Miller's theorem)，圖11-1的AC 電路分析如圖11-5所示。

其中米勒等效輸入電容($C_{in(miller)}$)與米勒等效輸出電容($C_{out(miller)}$)可表示為，

$$C_{in(Miller)} = C_{bc} (A_v + 1)$$

$$C_{out(Miller)} = C_{bc} \left(\frac{A_v + 1}{A_v} \right) \approx C_{bc}$$

$$A_v \cong \frac{R_C \parallel R_L}{r_e' + R_{E1}}$$

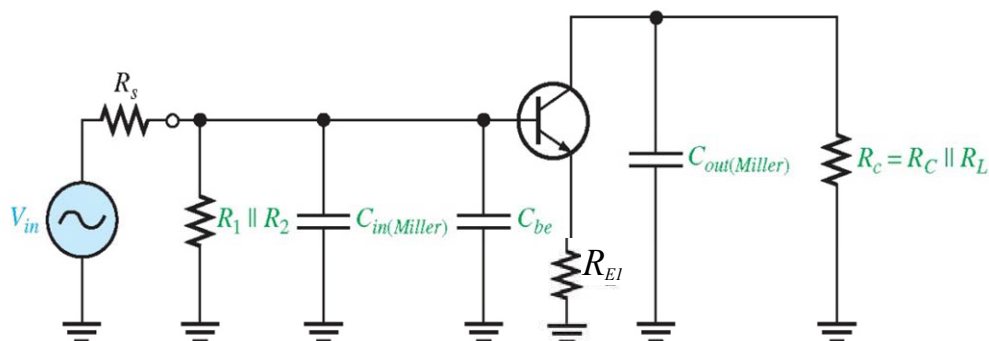


圖 11-5 將圖 11-1 之放大器考慮內電容的米勒等效 AC 電路。

(4a) 輸入端低通濾波效應

由圖11-5可得輸入端將產生一個低通濾波器(如圖 11-6 所示)，其轉角頻率 $f_{cu(input)}$ 可表示為，

$$f_{cu(input)} = \frac{1}{2\pi [R_s \parallel R_1 \parallel R_2 \parallel \beta_{ac} (r_e' + R_{E1})] (C_{be} + C_{in(Miller)})}$$

(4b) 輸出端低通濾波效應

由圖11-5可得輸出端將產生一個低通濾波器(如圖 11-7 所示)，其轉角頻率 $f_{cu(output)}$ 可表示為，

$$f_{cu(output)} = \frac{1}{2\pi(R_C \parallel R_L)C_{out(Miller)}}$$

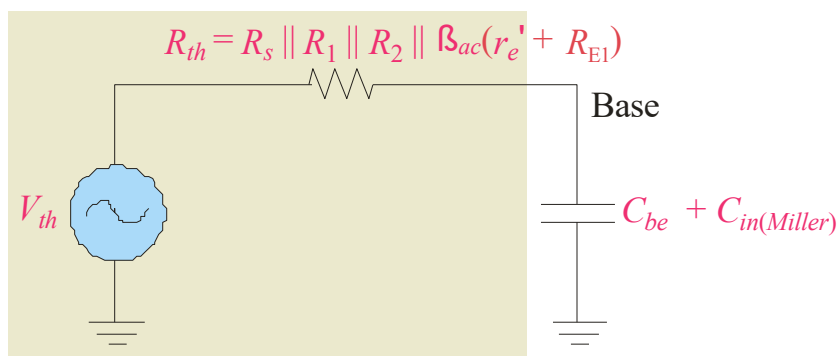


圖 11-6 將圖13-5之輸入端等效成的低通濾波器，其中 R_{th} 與 V_{th} 分別為戴維寧等效電路分析產生的電阻與電壓。

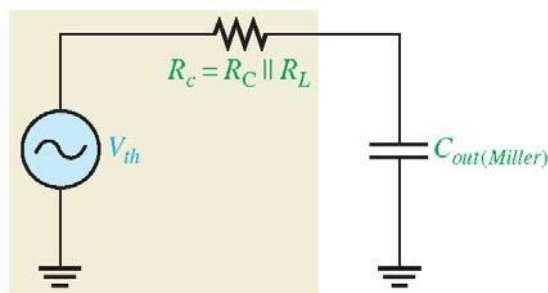


圖 11-7 將圖 11-5 之輸出端等效成的低通濾波器，其中 R_c 與 V_{th} 分別為戴維寧等效電路分析產生的電阻與電壓。

綜合(1)~(4)的結果，圖11-1 所示之放大器其頻率響應將如圖 11-8 所示。

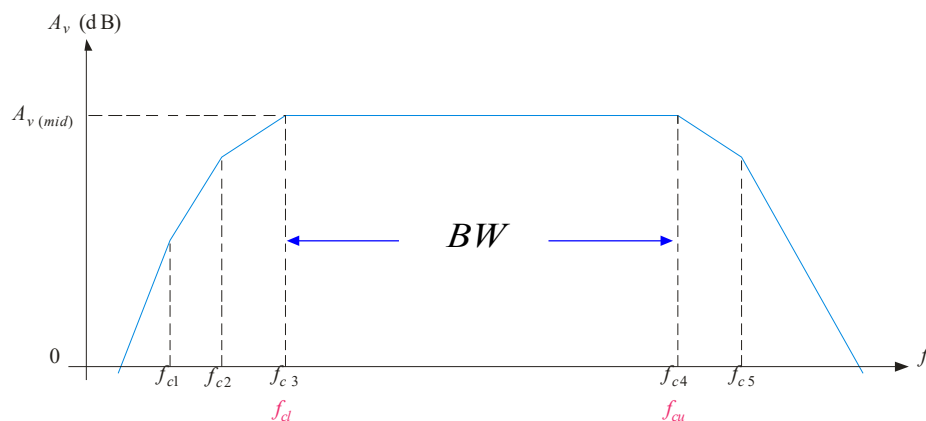
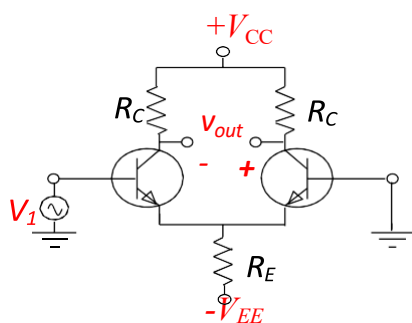


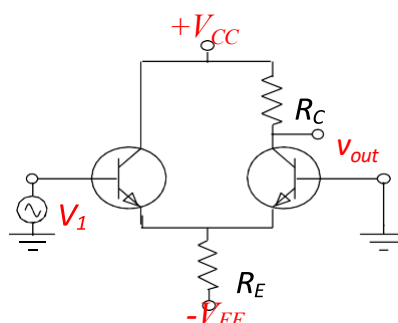
圖 11-8 圖 11-1 之放大器的頻率響應。

差動放大器

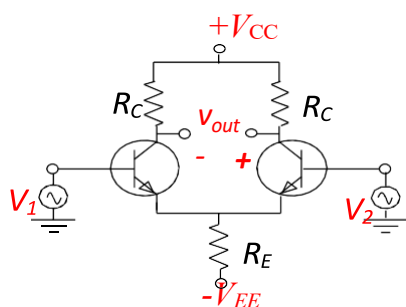
差動放大器主要由兩個電晶體組成，以 BJT 為例，其輸入端在 base 端，輸出端在 collector 端。更由於輸入訊號與輸出訊號的數目不同，可分為單輸入雙輸出，單輸入單輸出，雙輸入雙輸出，雙輸入單輸出(如圖 11-9 所示)。



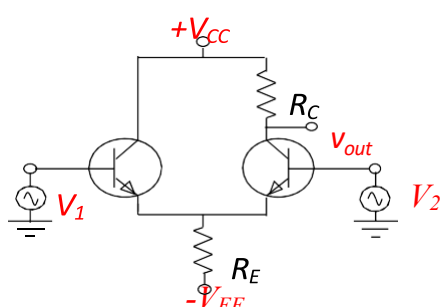
Single-ended input and double-ended output



Single-ended input and single-ended output



Double-ended input and Double-ended output



Double-ended input and single-ended output

圖 11-9 差動放大器分類圖。

(1) DC-電路分析

差動放大器的 DC-電路分析可如圖 11-10 所示，其中，

$$I_T = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E},$$

$$I_E = \frac{I_T}{2},$$

$$V_C = V_{CC} - I_E R_C.$$

(2) AC-電路分析

以單輸入雙輸出差動放大器為例，其 AC-電路分析可如圖 11-11 所示，

其中，

$$V_{out1} = i_e R_C,$$

$$V_{out2} = -i_e R_C,$$

$$V_{out} \triangleq V_{out1} - V_{out2} = 2i_e R_C.$$

$$A_v \triangleq \frac{V_{out}}{V_1} = \frac{R_C}{r'_e}$$

$$R_{in} = 2\beta_{ac} r'_e \text{ (輸入阻抗)}$$

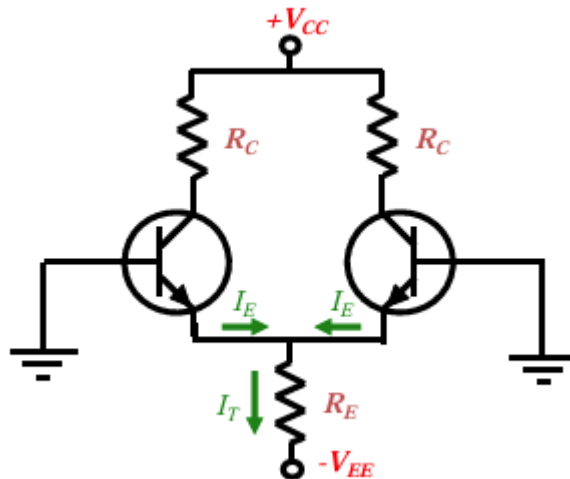


圖 11-10 差動放大器的 DC-電路分析示意圖

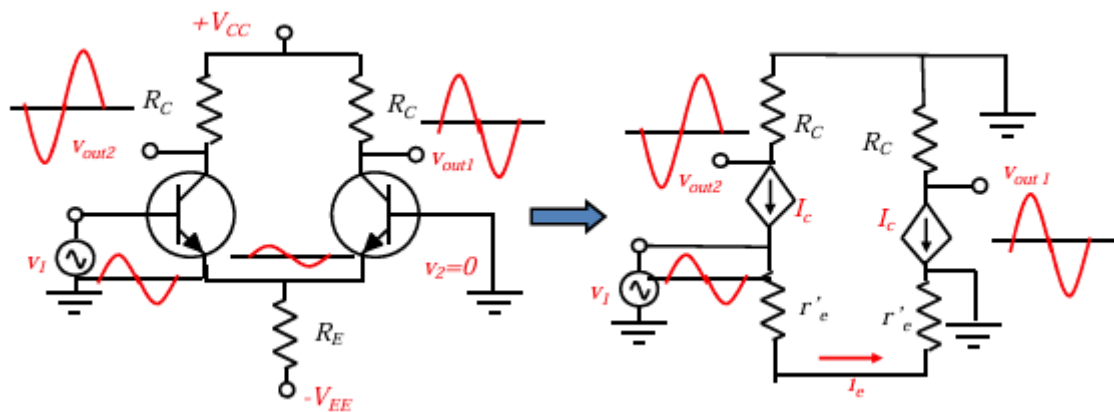


圖 11-11 單輸入雙輸出差動放大器的 AC-電路分析示意圖。

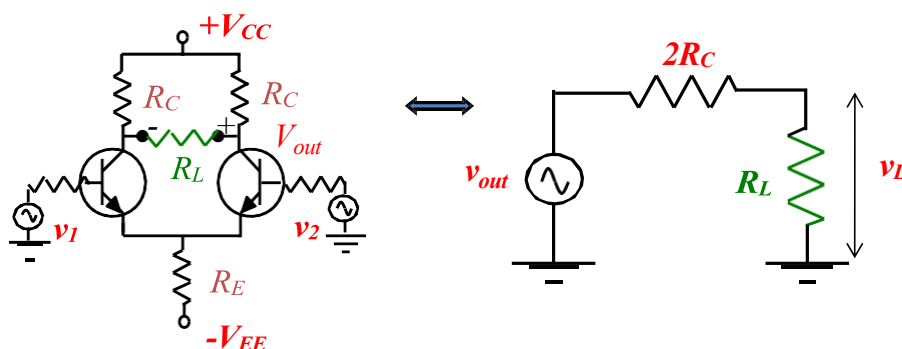
依照類似上述之分析，各類差動放大器的輸出結果可整理於表 11-2-1。

表 11-2-1 各類差動放大器之輸出結果一覽表

input	output	A_V	V_{out}
Double-ended (Differential)	Double-ended (Differential)	R_C/r_e'	$A_V(V_1-V_2)$
Double-ended (Differential)	Single-ended	$R_C/2r_e'$	$A_V(V_1-V_2)$
Single-ended	Double-ended (Differential)	R_C/r_e'	A_VV_1 or $-A_VV_2$
Single-ended	Single-ended	$R_C/2r_e'$	A_VV_1 or $-A_VV_2$

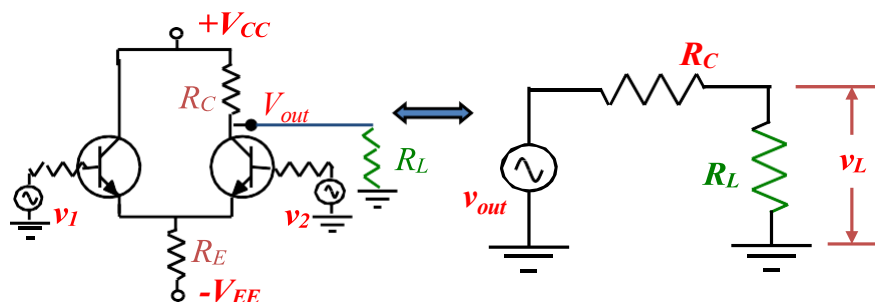
(3) 負載效應

當差動放大器之輸出端接上負載 R_L 時，其等效戴維寧電路將如圖 13-12 所示。



Thevenin equivalent circuit for double-ended(differential) output

(a)



Thevenin equivalent circuit for single-ended output

(b)

圖 11-12 負載效應對差動放大器的影響(a)雙輸出差動放大器；(b)單輸出差動放大器。

11-3 實驗步驟

實驗一：放大器的頻率響應

1. 連接如圖 11-1 所示之放大器；各元件表 11-3-1 所示。

表 11-3-1 實驗一電路元件

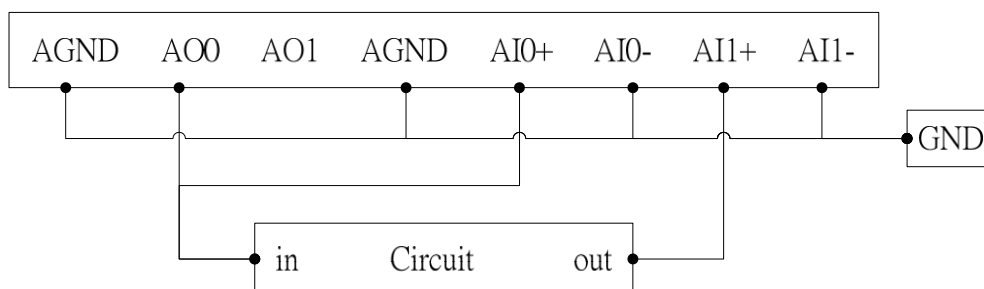
元件 or 符號	規格	型號
Q		2SC1815
V_{in}	50mV _{pp} (AC-訊號)	
V_{CC}	12V	
C_1	1μF	
C_2	47μF	
C_3	10μF	
R_1	10KΩ	
R_2	4.7KΩ	
R_{E1}	100Ω	
R_{E2}	330Ω	
R_C	1.0KΩ	
R_L	1.0KΩ	
R_s	請量出產波器內電阻。	

2. 以理論分析並完成下表。

表 11-3-2

電壓增益 $A_v \triangleq \frac{V_{out}}{V_b}$	高通轉角頻 $f_{cl(input)}$	高通轉角頻 $f_{cl(output)}$	高通轉角頻 $f_{cl(bypass)}$	低通轉角頻 $f_{cu(input)}$	低通轉角頻 $f_{cu(output)}$

3. 設定產波器 $V_s=50mV_{pp}$ ，調整 V_s 的頻率逐漸增加(10Hz, 1KHz, 100KHz, 10MHz)，以示波器觀察記錄你的輸入與輸出圖形。
4. 利用 MyDaq 的 Bode analyzer 量測此圖此放大器 1Hz~20KHz 的波德圖。
(路徑：National Instruments→NI ELVIS & NI myDAQ→Instruments→Bode analyzer)



實驗二：差動放大器

1. 連接一個如圖 11-11 之單輸入雙輸出差動放大器，且 V_{out1} 與 V_{out2} 間連接一個負載 R_L ，各元件表 11-3-3 所示。

表 11-3-3 實驗二電路元件

元件 or 符號	規格	型號
$Q1$		2SC1815
$Q2$		2SC1815
V_I	50mV _{pp} ; 1KHz	
V_{CC}	12V	
V_{EE}	12V	
R_C	1K Ω	
R_E	4.7K Ω	
R_L	10K Ω	

2. 以理論分析此差動放大器並完成下表。

表 11-3-4

無 R_L 時之電壓增益 $A_v \triangleq \frac{V_{out}}{V_I}$	負載 R_L 之電壓 $V_{R(\text{peak to peak})}$

5. 設定產波器 $V_I=50mV_{pp}$ ，1KHz，以示波器觀察並記錄輸入與輸出圖形(分別測試連接 R_L 與不連接 R_L 的結果)。

11-4 預習報告

依基本原理計算理論值並完成表 11-3-2 與表 11-3-4。

11-5 思考問題

1. 圖 11-11 的 AC-電路分析為何可將 R_E 忽略，在什麼條件下這樣的分析才是合理的？

附錄：實驗十一 BJT 電路(四) 放大器的頻率響應與差動放大器 BOM
實驗一

元件	規格與型號	數目(每組)
電晶體	2SC1815	1
電容	1 μ F	1
	47 μ F	1
	10 μ F	1
電阻	10K Ω	1
	4.7K Ω	1
	100 Ω	1
	330 Ω	1
	1.0K Ω	2

實驗二

元件	規格與型號	數目(每組)
電晶體	2SC1815	2
電阻	1K Ω	2
	4.7K Ω	1
	10K Ω	1

總表

元件	規格與型號	數目(每組)
電晶體	2SC1815	2
電容	1 μ F	1
	47 μ F	1
	10 μ F	1
電阻	10K Ω	1
	4.7K Ω	1
	100 Ω	1
	330 Ω	1
	1.0K Ω	2