

# CH10 差動放大器電路

## 差動放大器的介紹

### 一、差動放大器

1. 差動放大器(Differential Amplifier, 簡稱 D.A.)

→高增益及高共模拒斥比(CMRR)的放大器

2. 運算放大器的第一級電路即為差動放大器

### 二、名詞定義

1. 共模信號：即雜訊，相位相同部分。

$$v_c = \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2}$$

2. 差模信號：欲放大之信號，相位相反之部分。

$$v_d = v_{i1} - v_{i2}$$

3. 輸入信號改寫： $v_{i1} = v_c + \frac{v_d}{2}$ ， $v_{i2} = v_c - \frac{v_d}{2}$

4. 共模增益  $A_c$ ： $\frac{v_{o1}}{v_c}$

5. 差模增益  $A_d$ ： $\frac{v_{o1}}{v_d}$

6. 共模拒斥比 CMRR： $\frac{A_d}{A_c}$

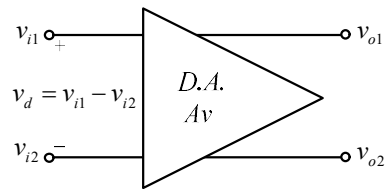
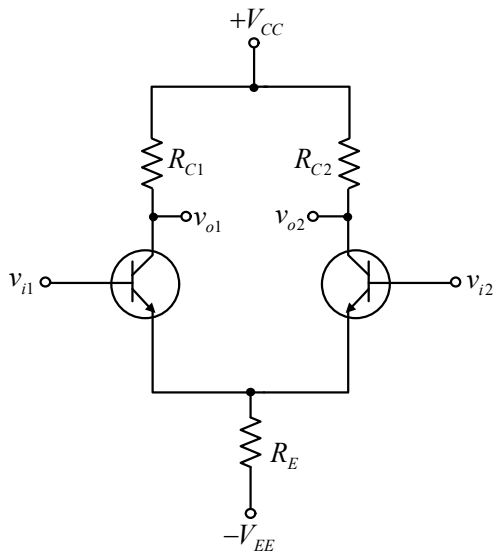
$$v_o = A_d v_d + A_c v_c = A_d v_d \left(1 + \frac{A_c v_c}{A_d v_d}\right)$$

7. 輸出：

$$= A_d v_d \left(1 + \frac{1}{CMRR} \cdot \frac{v_c}{v_d}\right)$$

### 三、結構與特性

1. 由兩個特性完全相同(理想上)之共射極放大電路(CE)組成：



2. 具有兩個輸入端，輸出信號和兩輸入端信號的差值成正比，通常雜訊會同時發生在兩輸入端，故可互相抵消，所以差動放大器抵抗雜訊能力甚高。

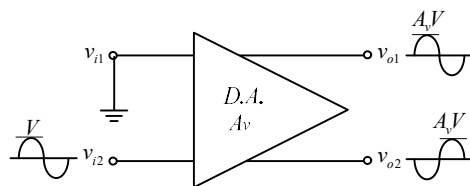
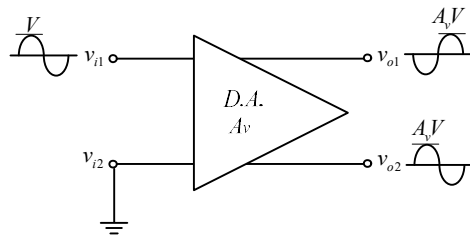
差動輸入訊號： $v_d = v_{i1} - v_{i2}$

差動輸出訊號： $v_{od} = A_v v_d = A_v (v_{i1} - v_{i2}) = v_{o1} - v_{o2}$

### 差動放大器的輸入輸出方式

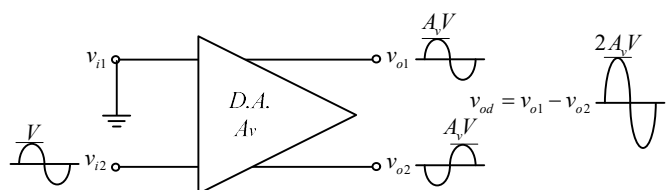
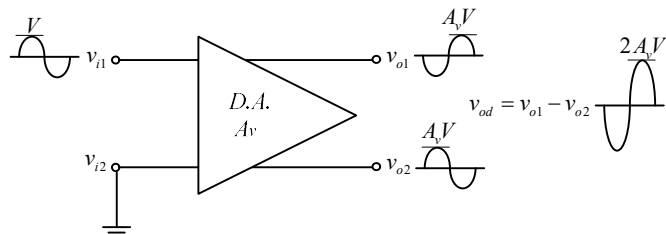
(1) 單端輸入不平衡輸出：

{ 單端輸入 → 指的是  $v_{i1} = 0$  或  $v_{i2} = 0$   
不平衡輸出 → 指的是輸出電壓取自  $v_{o1}$  或  $v_{o2}$



(2) 單端輸入平衡輸出：

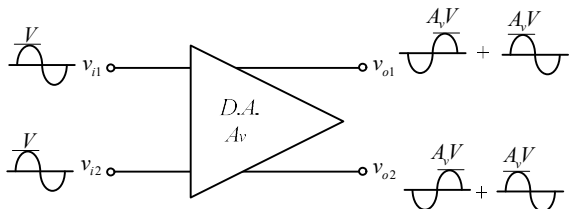
{ 單端輸入 →  $v_{i1} = 0$  或  $v_{i2} = 0$   
平衡輸出 → 輸出電壓取自  $v_{o1}$  和  $v_{o2}$ ， $v_{od} = v_{o1} - v_{o2}$



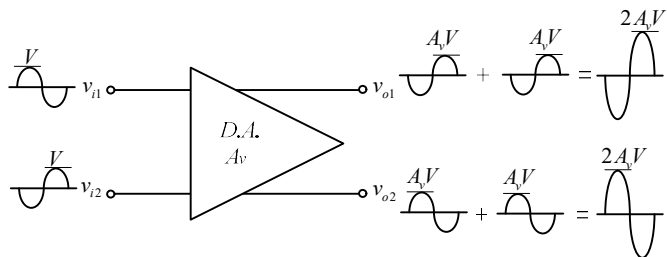
**(3) 雙端輸入不平衡輸出：**

雙端輸入 → 信號同時由  $v_{i1}$  及  $v_{i2}$  輸入  
 不平衡輸出 → 輸出電壓取自  $v_{o1}$  或  $v_{o2}$

a. 若  $v_{i1} = v_{i2}$ ，例如雜訊就是屬於雙端共模的信號，輸出圖形如下圖，即使是平衡輸出， $v_{od}$  也為零 → 雜訊被排除

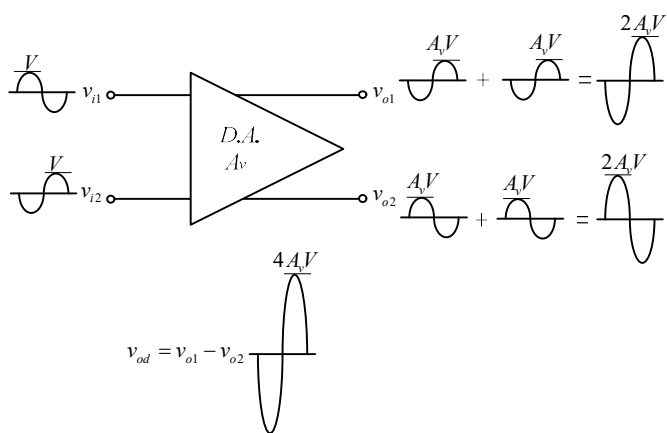


b. 若  $v_{i1} = -v_{i2}$ ，



**(4) 雙端輸入平衡輸出：**

雙端輸入 → 信號同時由  $v_{i1}$  及  $v_{i2}$  輸入  
 平衡輸出 → 輸出電壓取自  $v_{o1}$  和  $v_{o2}$ ， $v_{od} = v_{o1} - v_{o2}$

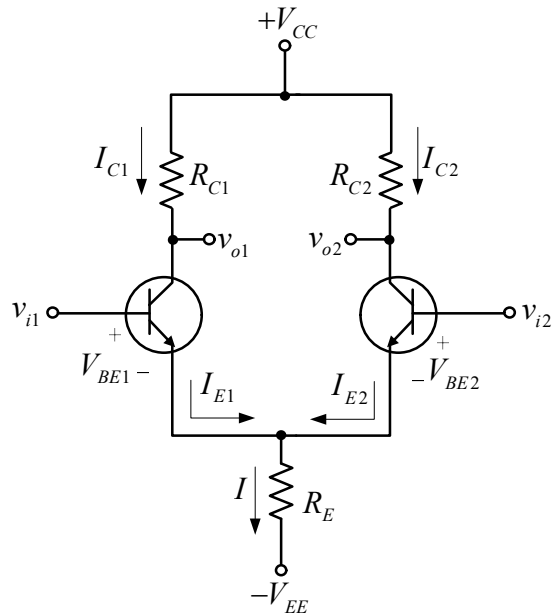


**差動放大器的直流分析**

一、原則：由下往上，先找出  $I_E$ ，再利用

$$I_{E1} = I_{E2} = \frac{I}{2} \text{ 進行分析。}$$

二、一般型之差動放大器直流分析時，交流信號  $v_{i1} = v_{i2} = 0$ ， $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ， $V_{BE1} = V_{BE2} = V_{BE}$ 。



$$V_{BE1} + IR_E - V_{EE} = 0, \quad V_{BE2} + IR_E - V_{EE} = 0$$

$$\therefore V_{BE1} = V_{BE2} = V_{BE} \approx 0 \therefore IR_E - V_{EE} = 0 \Rightarrow I = \frac{V_{EE}}{R_E}$$

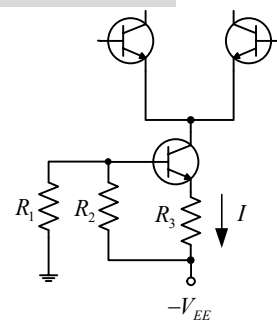
$$I_{E1} = I_{E2} = \frac{I}{2}, \quad I_{C1} \approx I_{C2} = \frac{I}{2}$$

$$V_{C1} = V_{CC} - I_{C1}R_{C1}, \quad V_{C2} = V_{CC} - I_{C2}R_{C2}$$

一、 $R_E$  不可太大，否則電晶體會不在線性區，但是為了提高差動放大器排斥雜訊能力， $R_E$  必須盡量大，利用電流源取代  $R_E$  可解決此一兩難之

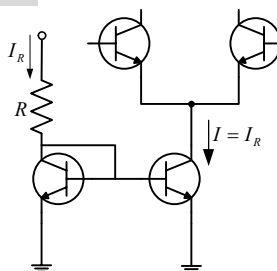
二、改良型(定電流源)之差動放大器

**(1) 以恆流源取代  $R_E$ ：**



$$I = \frac{-V_{EE} \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_{BE} + V_{EE}}{R_3} = \frac{V_{EE} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{BE}}{R_3}$$

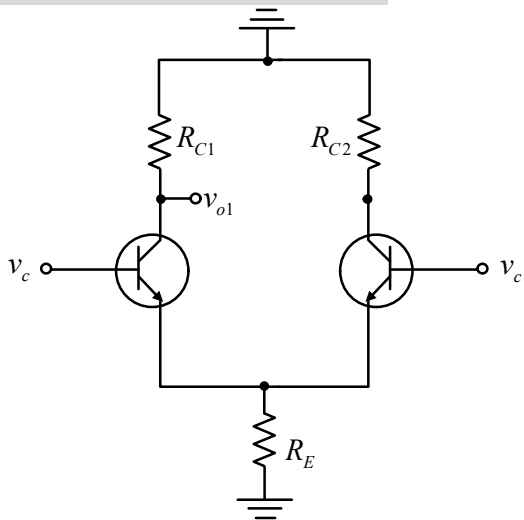
**(2) 電流鏡：**



## 差動放大器的交流分析

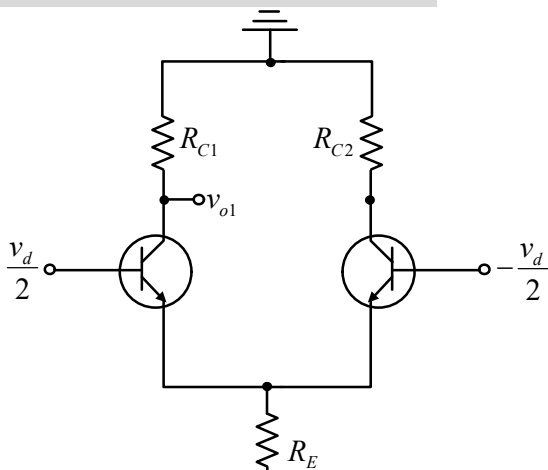
一、交流分析時，將直流電壓源短路，電晶體以等效電路取代之即可。其分析可分成兩種模式：

(1) 共模模式 (Common Mode) :  $v_c = \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2}$

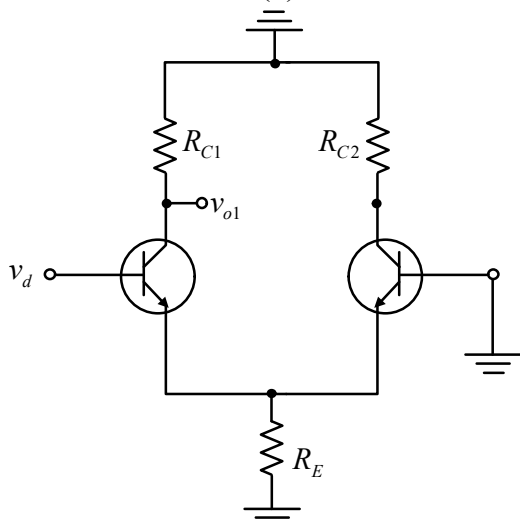


圖(a)

(2) 差模模式 (Differential Mode) :  $v_d = v_{i1} - v_{i2}$



圖(b)



圖(c)

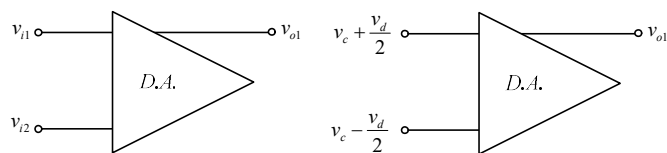
二、任何一組輸入信號  $v_{i1}$ 、 $v_{i2}$  均可以共模輸入信號  $v_c$  及差模輸入信號  $v_d$  取代。

說明：

$$\begin{cases} v_d = v_{i1} - v_{i2} \Rightarrow v_{i1} - v_{i2} = v_d \dots\dots (1) \\ v_c = \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2} \Rightarrow v_{i1} + v_{i2} = 2v_c \dots\dots (2) \end{cases}$$

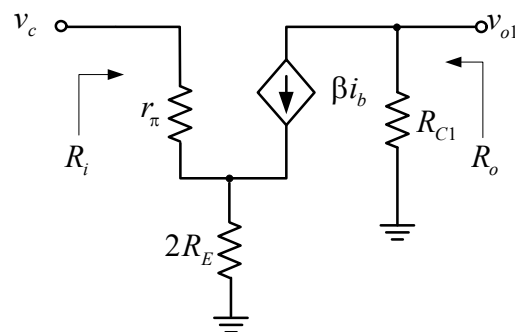
$$(1) + (2) \Rightarrow 2v_{i1} = 2v_c + v_d \Rightarrow v_{i1} = v_c + \frac{v_d}{2}$$

$$(1) - (2) \Rightarrow 2v_{i2} = 2v_c - v_d \Rightarrow v_{i2} = v_c - \frac{v_d}{2}$$



三、共模增益： $A_c$

(1) 考慮圖(a)雙端輸入，左右對稱，輸入共模信號  $v_c \rightarrow R_E$  被拆成  $2R_E // 2R_E \rightarrow$  電路左右對稱，劈半討論

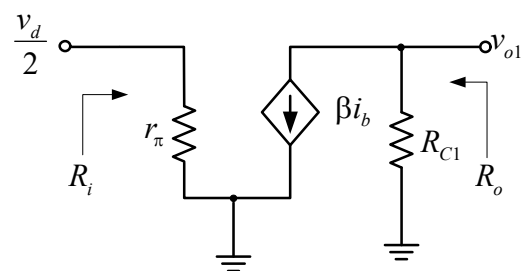


$$A_c = \frac{v_{o1}}{v_c} = \frac{-\beta i_b R_{C1}}{i_b r_\pi + (1 + \beta) i_b 2R_E} = \frac{-\beta R_{C1}}{r_\pi + (1 + \beta) 2R_E}$$

$$(1 + \beta) 2R_E \gg r_\pi \Rightarrow A_c = \frac{-\beta R_{C1}}{2R_E}$$

四、差模增益： $A_d$

(1) 考慮圖(b)雙端輸入，左右對稱，輸入差模信號  $\frac{v_d}{2} \rightarrow R_E$  被短路  $\rightarrow$  劈半討論



小信號模型求  $A_d$

$$A_v = \frac{v_{o1}}{\frac{v_d}{2}} = \frac{-\beta i_b R_{C1}}{i_b r_\pi} = \frac{-\beta R_{C1}}{r_\pi}$$

$$A_d = \frac{v_{o1}}{v_d} = \frac{A_v}{2} = \frac{-\beta R_{C1}}{2r_\pi}$$

$A_1$ : CE 放大之電壓增益

$A_2$ : CB 放大之電壓增益

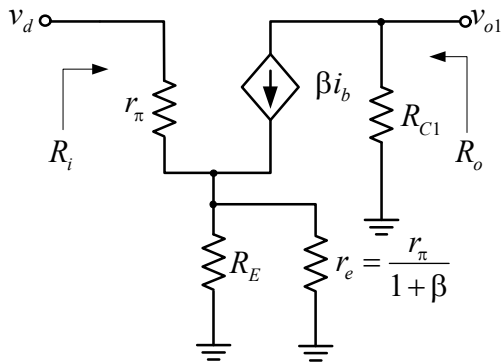
$A_c$ : 共模增益  $A_c = A_1 + A_2$

$A_d$ : 差模增益  $A_d = \frac{A_1 - A_2}{2}$

$$v_o = A_c v_c + A_d v_d, \quad v_c = \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2}, \quad v_d = v_{i1} - v_{i2}$$

(2) 考慮圖(c)單端輸入，輸入差模信號  $v_d \rightarrow Q_2$  的

射極端看進去等效電阻為  $r_e$ 。



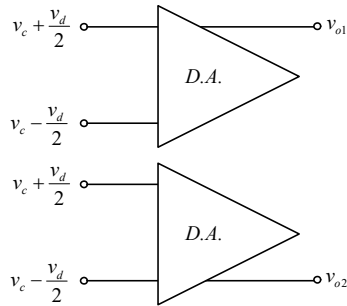
$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|, \quad CMRR(dB) = 20 \log_{10} \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

小信號模型求  $A_d$

$$A_d = \frac{v_{o1}}{v_d} = \frac{-\beta i_b R_{C1}}{i_b r_\pi + (1 + \beta) i_b \times \frac{r_\pi}{1 + \beta}} = \frac{-\beta R_{C1}}{2r_\pi}$$

**共模拒斥比(Common Mode Rejection Ratio)**

$$\begin{cases} v_{o1} = A_1 v_{i1} + A_2 v_{i2} \\ v_{o2} = A_2 v_{i1} + A_1 v_{i2} \end{cases}$$



以雙端輸入不平衡輸出為例：

$$\Rightarrow \begin{cases} v_{o1} = A_1 \left( v_c + \frac{v_d}{2} \right) + A_2 \left( v_c - \frac{v_d}{2} \right) \\ v_{o2} = A_2 \left( v_c + \frac{v_d}{2} \right) + A_1 \left( v_c - \frac{v_d}{2} \right) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} v_{o1} = (A_1 + A_2) v_c + \left( \frac{A_1 - A_2}{2} \right) v_d \\ v_{o2} = (A_1 + A_2) v_c - \left( \frac{A_1 - A_2}{2} \right) v_d \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} v_{o1} = A_c v_c + A_d v_d \\ v_{o2} = A_c v_c - A_d v_d \end{cases}$$