

# CH10.0 差動放大器

## 10.0.1 差動放大器的介紹

### 一、差動放大器

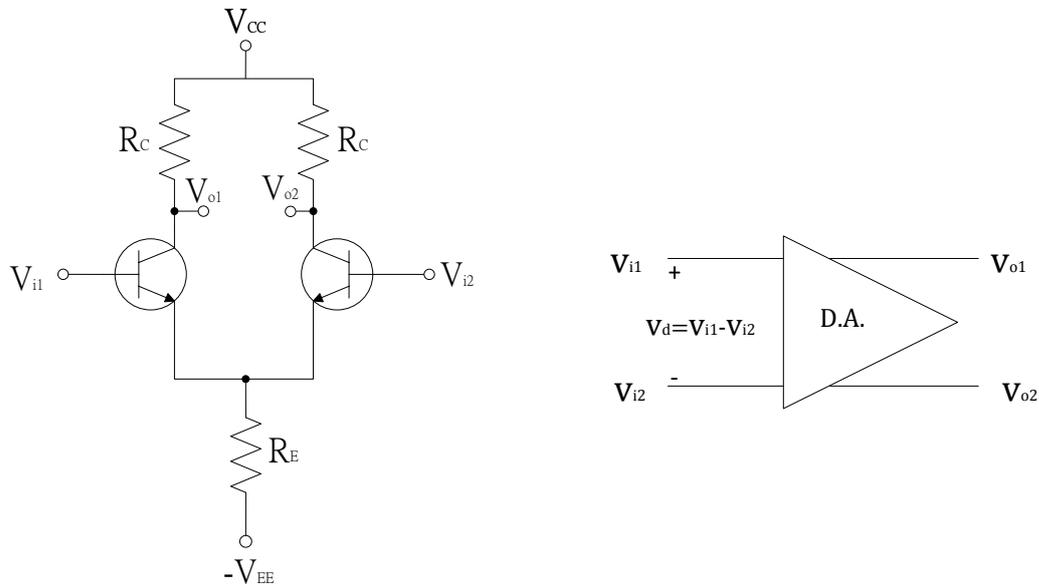
1. 差動放大器(Differential amplifier, 簡稱 DA)是一高增益及高共模拒斥比(CMRR)的放大器
2. 運算放大器的第一級電路即為差動放大器

### 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：所欲放大之信號，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  $A_C$ ： $\frac{V_{o1}}{V_d}$
- (5) 差模增益  $A_d$ ： $\frac{V_{o1}}{V_C}$
- (6) 共模拒斥比 CMRR： $\frac{A_d}{A_C}$
- (7) 輸出： $V_o = A_d V_d + A_C V_C = A_d V_d \left(1 + \frac{A_C V_C}{A_d V_d}\right) = A_d V_d \left(1 + \frac{1}{CMRR} \frac{V_C}{V_d}\right)$

### 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，如圖



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。

差動輸入信號： $v_d = v_{i1} - v_{i2}$ ；差動輸出信號： $v_{od} = A_v v_d = v_{o1} - v_{o2}$

3. 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。

四、差動放大器之輸入輸出方式

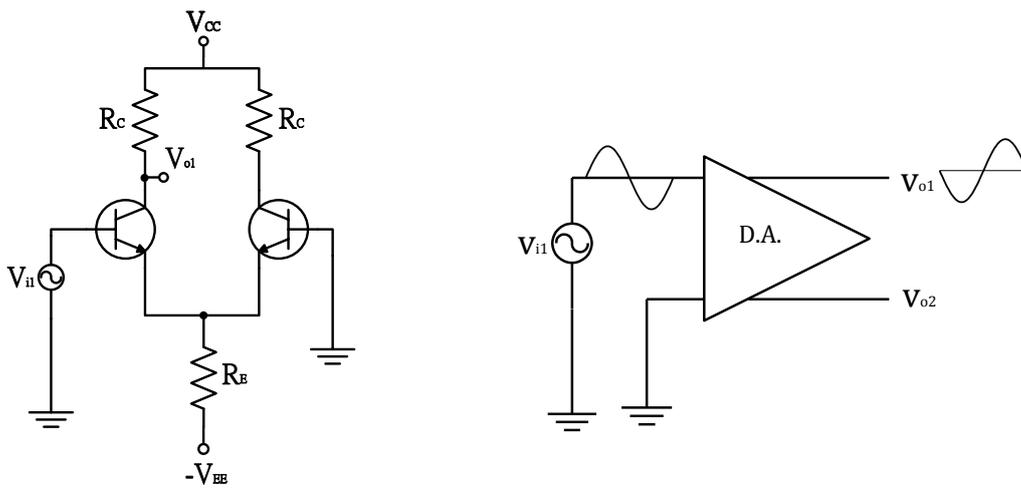
差動放大器之輸入輸出方式有四種

1. 單端輸入不平衡輸出：

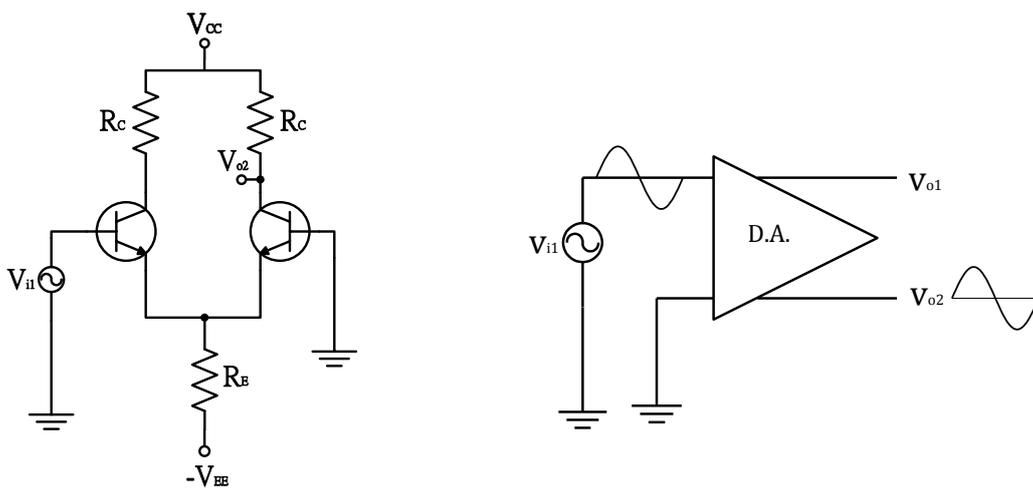
- 單端輸入 → 指的是  $V_{i1} = 0$  或  $V_{i2} = 0$
- 不平衡輸出 → 指的是輸出電壓取自  $V_{o1}$  或  $V_{o2}$

電路分析

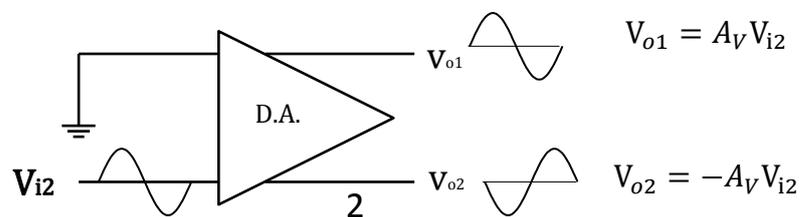
(1)  $Q_1$ ：輸入信號  $V_{i1}$  由  $Q_1$  基極進入，輸出信號若取自  $V_{o1}$  則  $Q_1$  形成一共同射極反相放大器



(2)  $Q_2$ ：輸入信號  $V_{i1}$  由  $Q_1$  射極電阻  $R_E$  耦合至  $Q_2$  的射極，此時  $Q_1$  如同一隨耦器，而  $Q_2$  則如同一輸入信號由射極進入，但輸出取自集極的共基極放大電路



(3) 通常假設  $A_{V1} = A_{V2} = A_V$ ，則  $V_{o1}$ 、 $V_{o2}$  兩輸出信號大小相同



2. 單端輸入平衡輸出：

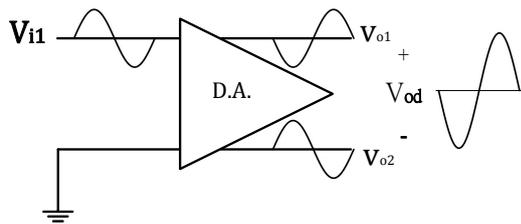
$$\begin{cases} \text{單端輸入} \rightarrow V_{i1} = 0 \text{ 或 } V_{i2} = 0 \\ \text{平衡輸出} \rightarrow \text{輸出電壓取自 } V_{o1} \text{ 和 } V_{o2}, \text{ 即 } V_{od} = |V_{o1} - V_{o2}| \end{cases}$$

(1) 若  $A_{V1} = A_{V2} = A_V$  成立，則  $V_{od} = |V_{o1} - V_{o2}| = |(-A_V V_{i1}) - (-A_V V_{i1})| = 2A_V V_{i1}$

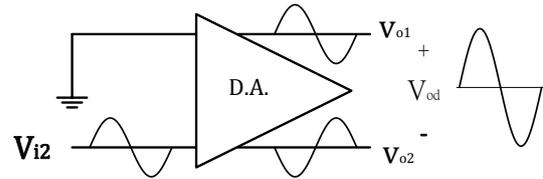
或  $V_{od} = |V_{o1} - V_{o2}| = |(-A_V V_{i2}) - (-A_V V_{i2})| = 2A_V V_{i2}$

平衡輸出為不平衡輸出的 2 倍

(a)  $V_i$  由  $Q_1$  輸入



(b)  $V_i$  由  $Q_2$  輸入

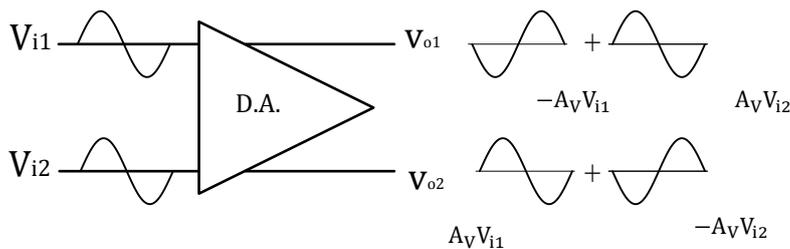


3. 雙端輸入不平衡輸出：

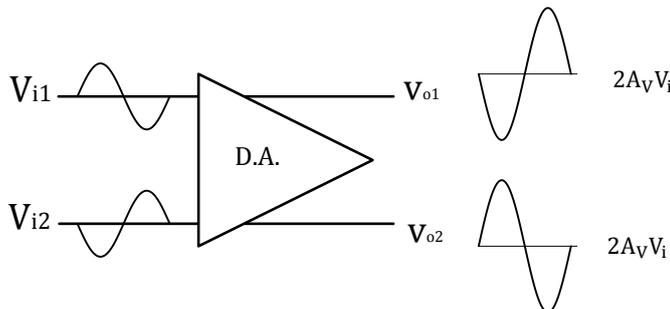
$$\begin{cases} \text{雙端輸入} \rightarrow \text{信號同時由 } V_{i1} \text{ 及 } V_{i2} \text{ 輸入} \\ \text{不平衡輸出} \rightarrow \text{輸出電壓取自 } V_{o1} \text{ 或 } V_{o2} \end{cases}$$

(1) 若  $V_{i1} = V_{i2}$ ，例如雜訊就是屬於雙端同模的信號，輸出圖形如圖

即使是平衡輸出， $V_{od}$  也為零 → 雜訊被排除



(2) 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  $V_{o2}$ ，即  $V_{od} = |V_{o1} - V_{o2}|$

10.0.2 差動放大器的直流分析

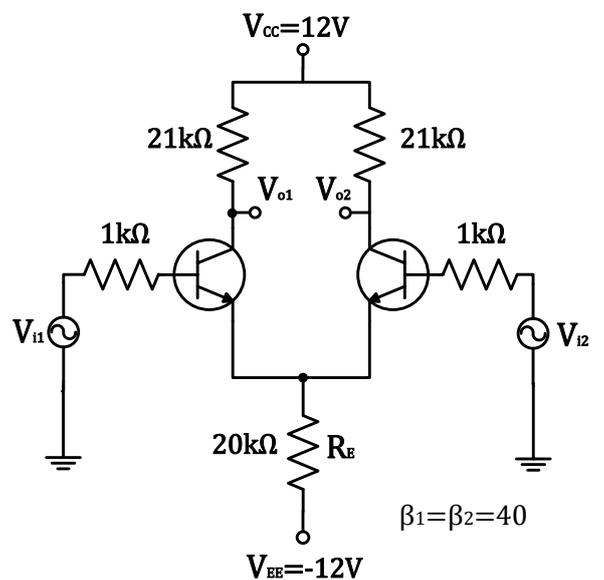
一、原則：

由下往上，先找出  $I_E$ ，再利用  $I_{E1} = I_{E2} = I_E/2$  進行分析

二、一般型之差動放大器

直流分析時，交流信號  $V_{i1} = V_{i2} = 0$

(1) 假設  $V_{B1} = V_{B2} = 0$



驗證假設：

$I_{B1} =$

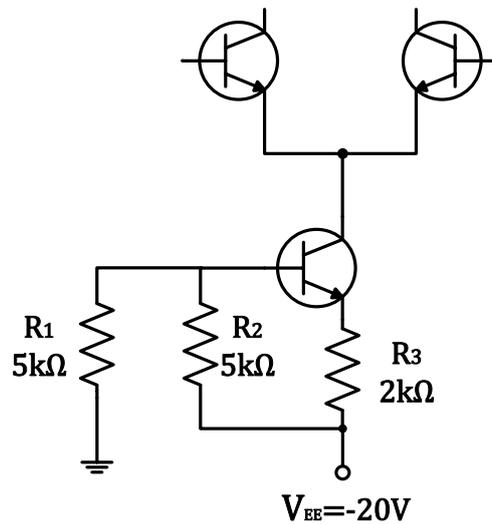
$V_B =$

(2) 由於  $Q_1$ 、 $Q_2$  特性相同，找工作點 ( $V_{CQ}$ 、 $I_{CQ}$ )

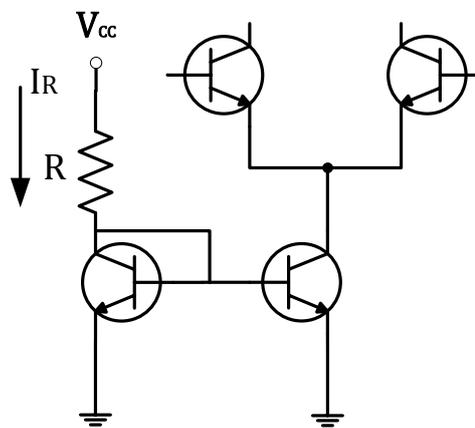
(3)  $R_E$  不可太大，否則電晶體會不在線性區，但是為了提高差動放大器排斥雜訊能力， $R_E$  必須盡量大(交流分析解釋)，利用電流源取代  $R_E$  可解決此一兩難之

### 三、改良型(定電流源)之差動放大器

(1) 以恆流源取代  $R_E$



(2) 電流鏡



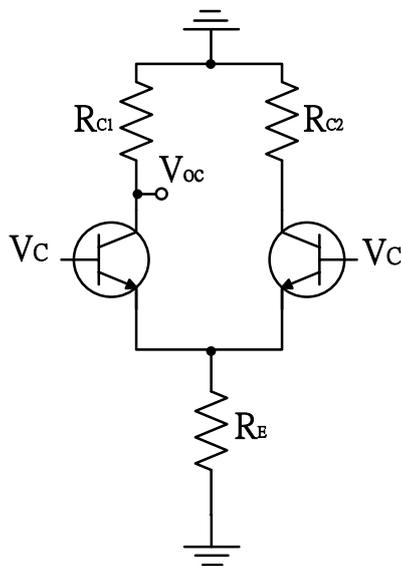
### 10.0.3 差動放大器的交流分析

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：共模模式(Common Mode)、差模模式(Differenrial Mode)

#### 一、共模、差模模式

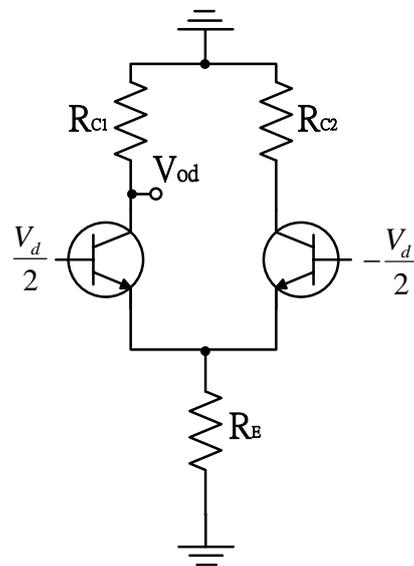
##### 1. 共模模式

其中  $V_C = \frac{V_{i1} + V_{i2}}{2}$



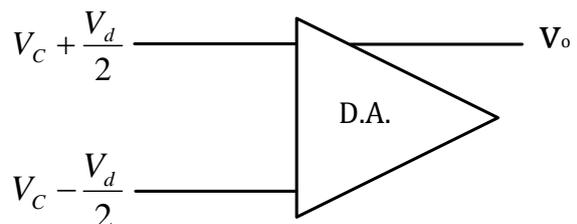
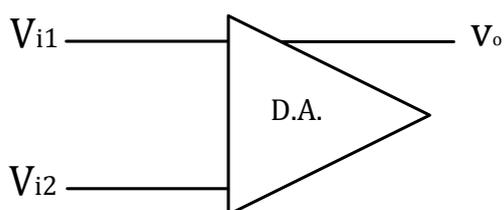
##### 2. 差模模式

其中  $V_d = V_{i1} - V_{i2}$



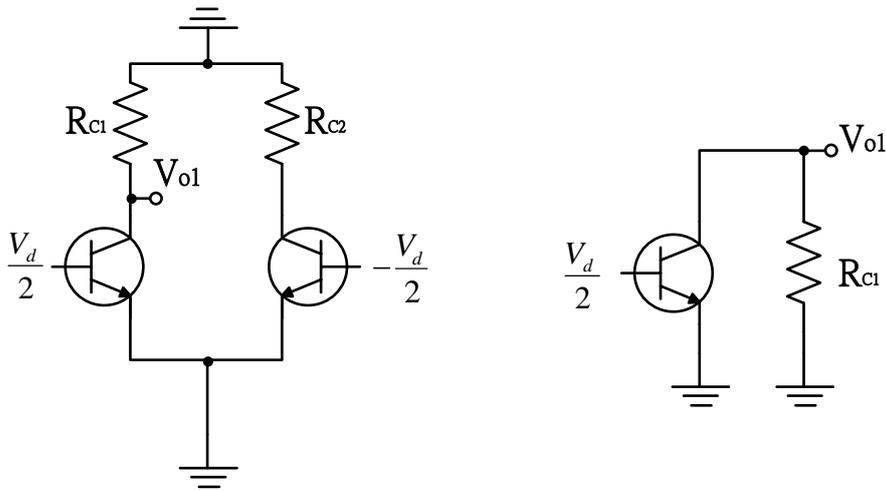
3. 任何一組輸入信號  $V_{i1}$ 、 $V_{i2}$  均可以共模輸入信號 ( $V_C$ ) 及差模輸入信號 ( $V_d$ ) 取代

說明：



二、差模增益： $A_d$

1.  $R_E$  身上的電流為純直流  $\rightarrow R_E$  被短路  $\rightarrow$  電路左右對稱，劈半討論



2. 小信號模型求  $A_V$

$$A_V = \frac{V_{o1}}{V_d/2} = \frac{-\beta i_b R_{C1}}{i_b r_{\pi}} =$$

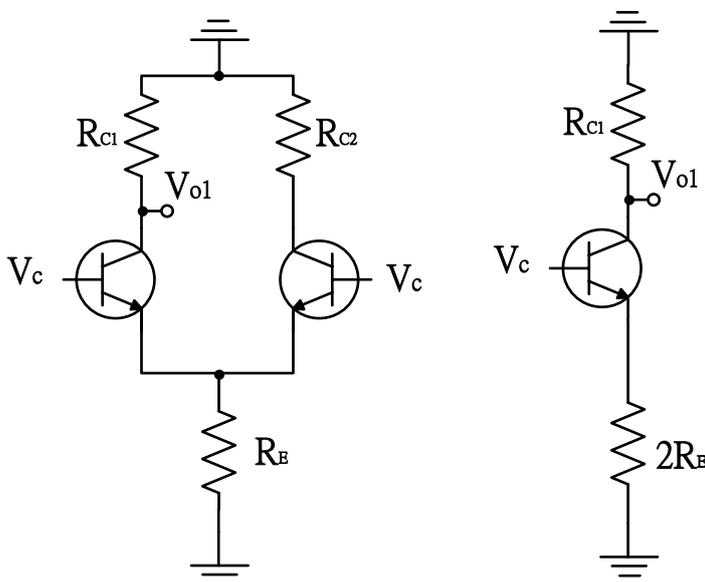
$$A_d = \frac{V_{o1}}{V_d} = \frac{A_V}{2} =$$

3. 若改成平衡輸出，則

$$A_d = \frac{V_{o1} - V_{o2}}{V_d} =$$

三、共模增益

1. 考慮左右對稱  $\rightarrow R_E$  拆成  $2R_E \parallel 2R_E \rightarrow$  電路左右對稱，劈半討論



2. 小信號模型求 $A_V$

$$A_c = \frac{V_{o1}}{V_c} = \frac{-\beta i_b R_{c1}}{i_b r_\pi + (1 + \beta) i_b \cdot 2R_E} =$$

3. 若改成平衡輸出，則

$$A_c = \frac{V_{o1} - V_{o2}}{V_c} =$$

四、共模拒斥比(CMRR)

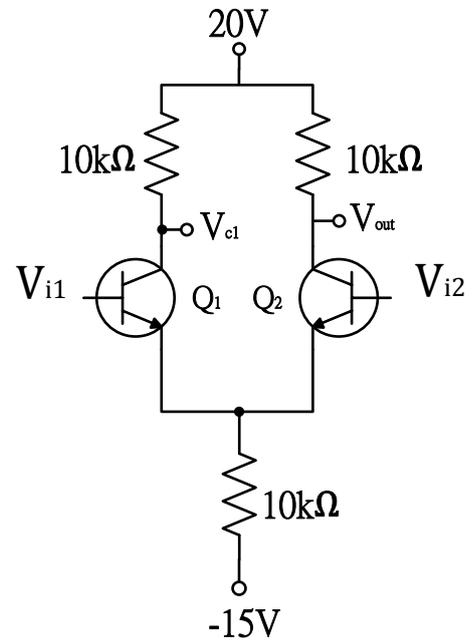
$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|, \quad CMRR(\text{dB}) = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \frac{r_\pi + (1 + \beta) \cdot 2R_E}{2r_\pi} = \frac{r_e + 2R_E}{2r_e}$$

1. 交流分析時， $R_E$ 越大，則 CMRR 值也越大，差動放大器品質越佳
2. 但 $R_E$ 若太大，則無法兼顧 $Q_1$ 、 $Q_2$ 直流工作點 $\rightarrow R_E$ 不能太大
3. 故由 1、2，將 $R_E$ 以恆流源取代
  - (1)有固定電流，維持直流工作點
  - (2)內阻無限大，CMRR 可無限大
4. 輸出信號  $V_o = A_d V_d + A_c V_c =$

例題 1：如圖所示若  $\beta = 150$ ，試求(1) $I_{c1}$ 及 $V_{c1}$  (2)差動電壓增益 $A_d = \frac{V_{out}}{V_{i1}-V_{i2}}$

(3)共模電壓增益 $A_c$  (4)CMRR



例題 2 某差動放大器，其 CMRR=60dB，

$$A_d = 10^3 \cdot \text{設 } V_{i1} = 10\mu\text{V} \cdot$$

$$V_{i2} = -10\mu\text{V} \cdot \text{求 } V_o ?$$

例題 3 某一差動放大器 $V_{i1} = V_{i2} = 1\text{V}$ 時，

$$V_o = 0.1\text{V} ; \text{而 } V_{i1} = -V_{i2} = 0.5\text{V}$$

$$\text{時 } V_o = 100\text{V} \cdot \text{求 } V_{i1} = 2\text{mV} \cdot V_{i2} = 1\text{mV}$$

時之 $V_o$  ?