

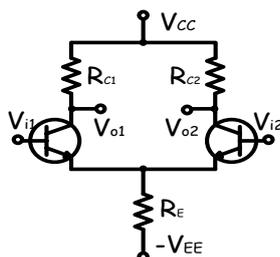
第十章 運算放大電路

※10-1 差動放大器

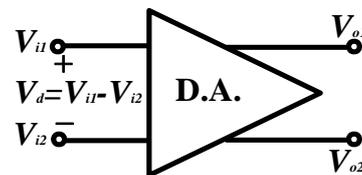
1. 差動放大器(DA)是一種將兩輸入信號差量放大而
且能抵消雜音的一種高增益、高輸入阻抗放大器。

2. 差動放大器之基本結構：

(1). 差動放大器是由二個特性相似的共射極放大電路
(CE)所組成，為一對稱電路，採用直接耦合方式
連接，兩個電晶體均偏壓於工作區，其電路圖及
電路符號如圖(10-1-1)及如圖(10-1-2)所示。



圖(10-1-1) 基本結構



圖(10-1-2) 符號

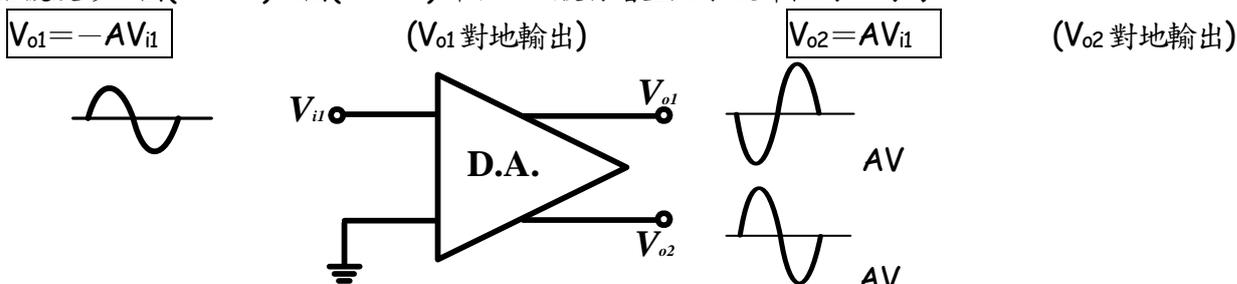
其中 差動輸入信號： $V_d = V_{i1} - V_{i2}$

差動輸出信號： $V_{od} = V_{o1} - V_{o2}$

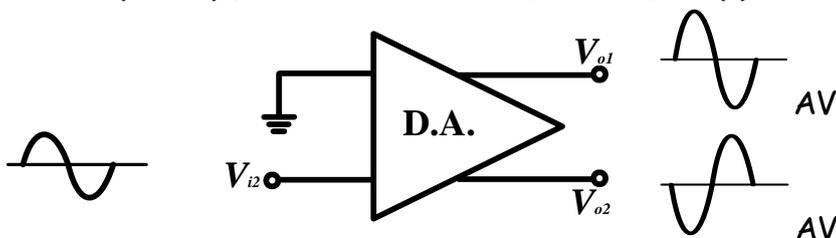
(2). $V_{od} = A_v \times V_d = A_v \times (V_{i1} - V_{i2}) = V_{o1} - V_{o2}$

3. 差動放大器(DA)之操作模式依輸入輸出方式不同共分成四種：單端輸入不平衡輸出、單端輸入平衡輸出、雙端輸入不平衡輸出、雙端輸入平衡輸出。

(1). 單端輸入不平衡輸出：輸入信號由 V_{i1} 或 V_{i2} 任一端輸入，另一端為當輸入端之 V_{i1} 或 V_{i2} 接地，輸出信號由 V_{o1} 或 V_{o2} 任一端輸出。若由 V_{i1} 輸入，由 V_{o1} 輸出則為一 CE 放大。若由 V_{i1} 輸入，由 V_{o2} 輸出則為一 CB 放大。其電路及信號波形如圖(10-1-3)及圖(10-1-4)所示，一般將增益大小設計相同，均為 A 。



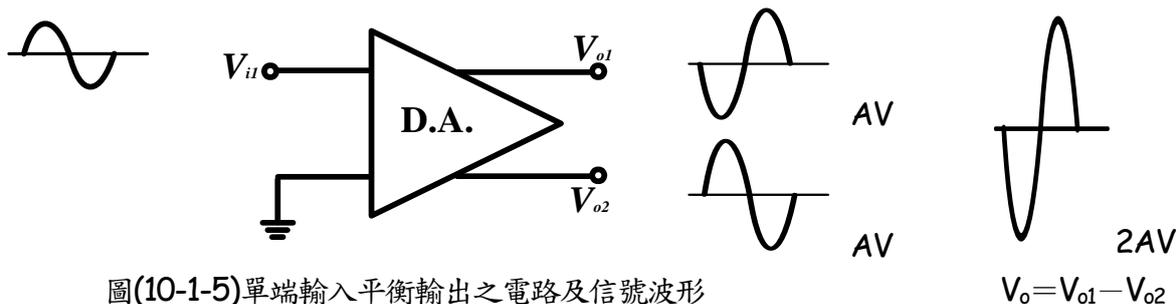
圖(10-1-3)單端輸入不平衡輸出之電路及信號波形(a)



圖(10-1-4)單端輸入不平衡輸出之電路及信號波形(b)

(2). 單端輸入平衡輸出：輸入信號由 V_{i1} 或 V_{i2} 任一端輸入，另一端為當輸入端之 V_{i1} 或 V_{i2} 接地，輸出信號由 V_{o1} 及 V_{o2} 共同決定輸出。其電路及信號波形如圖(10-1-5)所示。

$V_o = V_{o1} - V_{o2} = -2AV_{i1}$ 或 $V_o = V_{o2} - V_{o1} = 2AV_{i1}$ (由 V_{o1} 及 V_{o2} 兩端輸出)

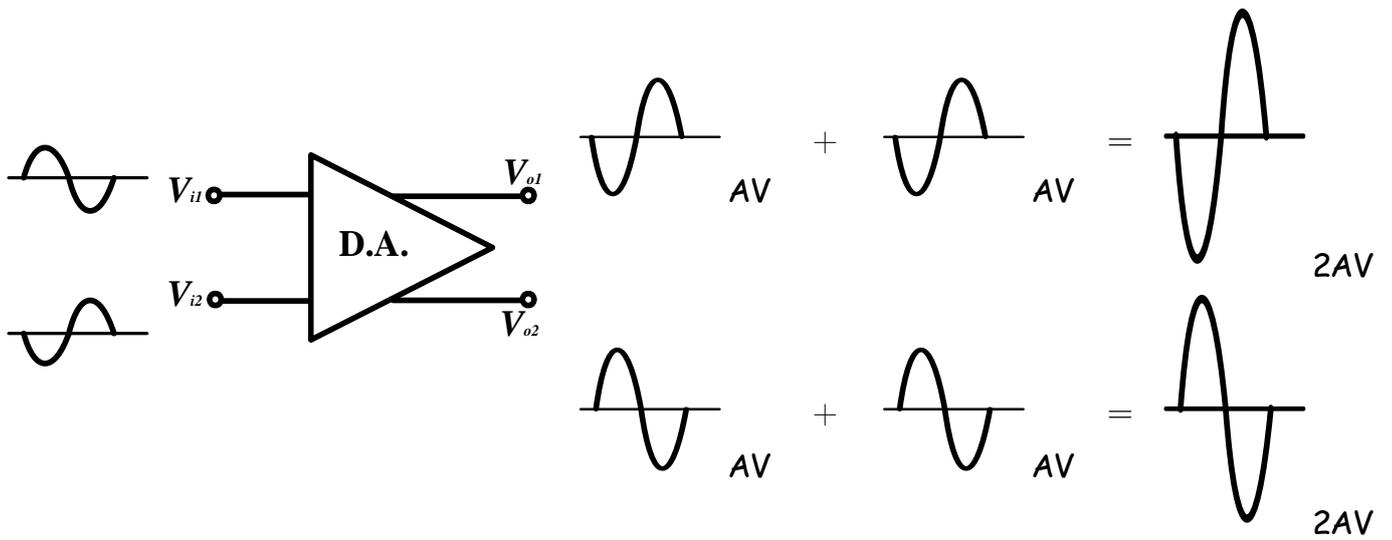


圖(10-1-5)單端輸入平衡輸出之電路及信號波形

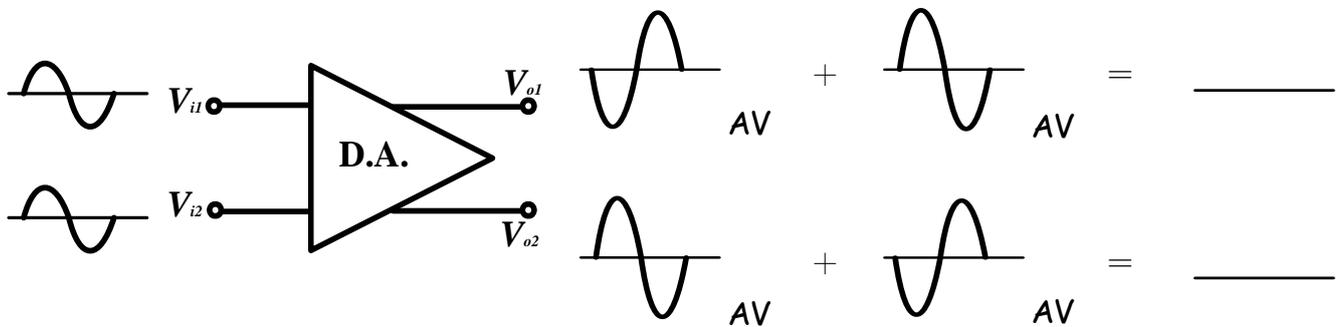
(3). 雙端輸入不平衡輸出：輸入信號由 V_{i1} 及 V_{i2} 端輸入，輸出信號由 V_{o1} 或 V_{o2} 任一端輸出。其電路及信號波形如圖(10-1-6)所示。

$V_{o1} = -A \times V_{i1} + AV_{i2} = A(V_{i2} - V_{i1})$ [V_{o1} 對地輸出]

$V_{o2} = A \times V_{i1} - AV_{i2} = A(V_{i1} - V_{i2})$ [V_{o2} 對地輸出]



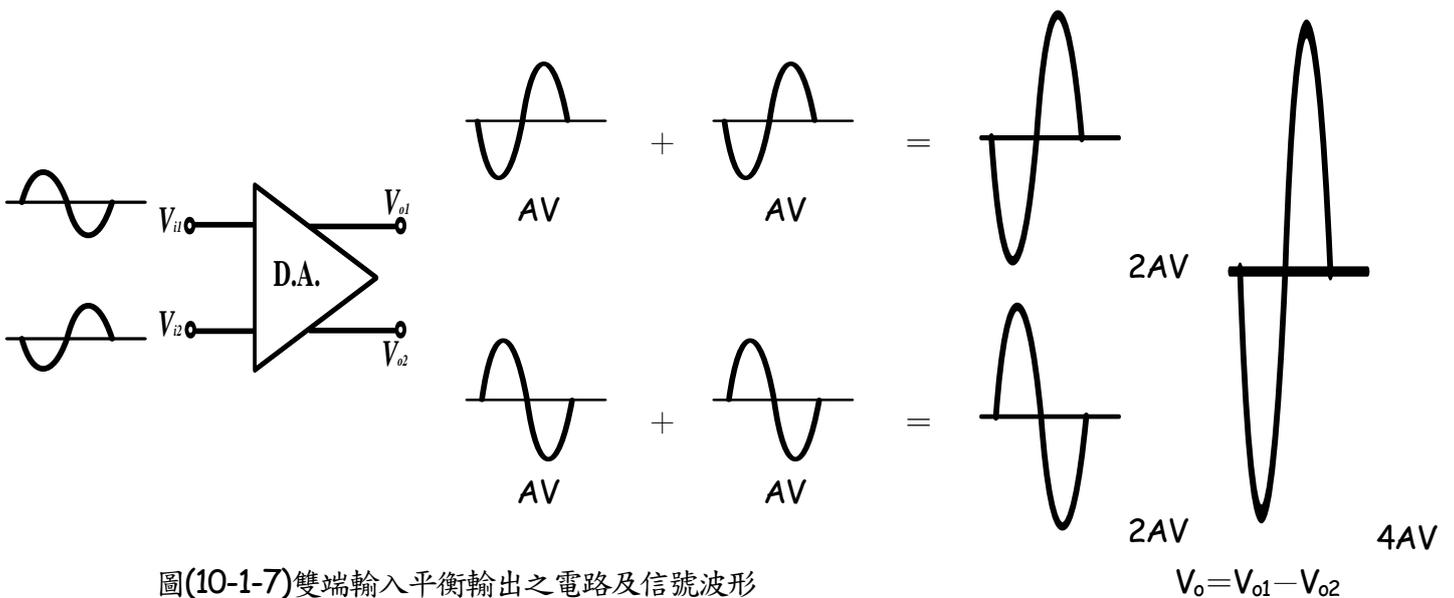
圖(10-1-6A)雙端輸入不平衡輸出之電路及信號波形(不同信號輸入)



圖(10-1-6B)雙端輸入不平衡輸出之電路及信號波形(相同信號輸入)

(4).雙端輸入平衡輸出：輸入信號由 V_{i1} 及 V_{i2} 端輸入，輸出信號由 V_{o1} 及 V_{o2} 共同決定輸出。其電路及信號波形如圖(10-1-7)所示。

$$V_o = V_{o1} - V_{o2} \text{ 或 } V_o = V_{o2} - V_{o1} \quad (\text{由 } V_{o1} \text{ 及 } V_{o2} \text{ 兩端輸出})$$



圖(10-1-7)雙端輸入平衡輸出之電路及信號波形

4.轉換特性：差動放大器的輸入($V_{i1} - V_{i2}$)超過 $+4V$ 時，其輸出幾乎不再變化可作為電壓限制器。

5.理想差動放大器：

- ① $A_d = \infty$ ② $A_c = 0$ ③ $CMRR = \infty$ ④ $Z_i = \infty$ ⑤ $Z_o = 0$

⑥實際的差動放大器必須加入適當的抵補電壓及抵補電流，其抵補電壓典型值為 $1mV \sim 2mV$ ，且抵補電壓值將隨溫度升高而增大其值。

6.名詞介紹:

(1).共模信號：雜訊即是共模信號。 $V_C = \frac{V_{i1} + V_{i2}}{2}$

(2).差模信號：電路欲放大的信號。 $V_d = V_{i1} - V_{i2}$ 。

(3).共模增益： $A_C = A_1 + A_2 = -\frac{R_{c1}}{2R_E}$ 。

(4).差模增益： $A_d = \frac{1}{2}(A_1 - A_2) = -\frac{\beta R_{c1}}{2r_\pi}$ ， (愈大愈好)。

(5).共模拒斥比(Common Mode Rejection Ratio)：簡稱為 **CMRR**，為差動放大器對共模信號之排斥能力，理想差動放大器只對差模信號有響應，而對共模輸入(雜訊)無響應，及對差模信號放大，而不對共模信號放大，故 **CMRR** 愈大差動放大器品質愈好。

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad CMRR_{(dB)} = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad \text{理想 CMRR 值} = \infty$$

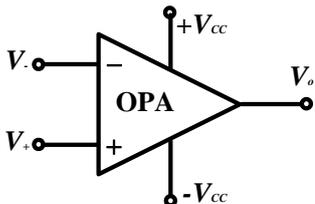
(6).差動放大輸出電壓：

$$V_o = A_c V_C + A_d V_d = A_d V_d \left(\frac{A_c V_C}{A_d V_d} + 1 \right) = A_d V_d \left(\frac{1}{CMRR} \times \frac{V_C}{V_d} + 1 \right)$$

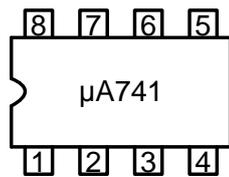
※10-2 運算放大器的基本概念

1.OPA 之定義：運算放大器簡稱為 **OPA**，是一種高增益的差動放大器，屬於交流放大器，其內部採用直接交連方式，由線性積體電路所構成，它藉由電壓回授以提供穩定的電壓增益，具有極大之開迴路增益(2×10^5 以上)，功能廣泛且穩定度高，可應用來操作許多數學運算，所以稱為運算放大器，製作成積體電路，運算放大器之結構與符號如圖(10-2-1)：

2.OPA 之編號：目前較常用的 OPA 有 $\mu A709$ 、 $\mu A741$ 、 $\mu A747$ 、CA3130、CA3140、LM324、TL081、TL082、TL084 等，用途最廣泛為 $\mu A741$ ，其外觀、接腳如圖(10-2-2)：



符號 圖(10-2-1)



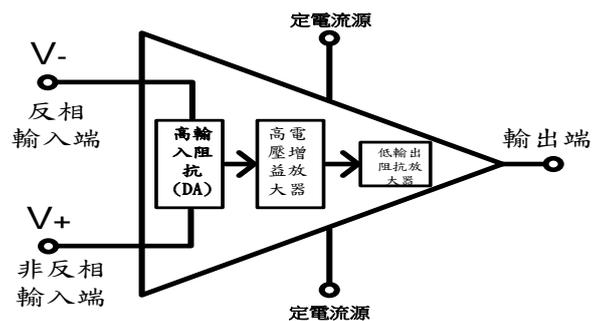
外觀 圖(10-2-2)

- | | |
|--------------|--------------|
| 第 1 腳：抵補電壓調整 | 第 5 腳：抵補電壓調整 |
| 第 2 腳：反相輸入端 | 第 6 腳：輸出端 |
| 第 3 腳：非反相輸入端 | 第 7 腳：正電源 |
| 第 4 腳：負電源 | 第 8 腳：空腳 |

3.運算放大器之基本結構如圖(10-2-3)，其組成包括：高輸入阻抗之差動放大器(DA)、高電壓增益放大器、低輸出阻抗放大器。

4.運算放大器的理想特性為：

- (1).『輸入阻抗 $R_i \rightarrow \infty$ 』 \Rightarrow 因此可將輸入端電流視為零($I_i \rightarrow 0$)。
- (2).『輸出阻抗 $R_o \rightarrow 0$ 』 \Rightarrow 無負載效應，有良好的阻抗匹配。
- (3).『開迴路增益 $A_{vo} \rightarrow \infty$ 』 \Rightarrow 兩輸入端可視為短路。
- (4).『頻帶寬度 $BW \rightarrow \infty$ 』 \Rightarrow 有很好的頻率響應。
- (5).『輸入抵補電壓 $V_{io} \rightarrow 0$ 』 \Rightarrow 即 $V_- = V_+$ 時， $V_o = 0$ 。
- (6).『共模互斥比 $CMRR \rightarrow \infty$ 』 \Rightarrow 可完全排除雜訊。
- (7).『無延遲時間 $t_r \rightarrow 0$ 』
- (8).特性不隨溫度變化而改變 \Rightarrow 無漂移現象。



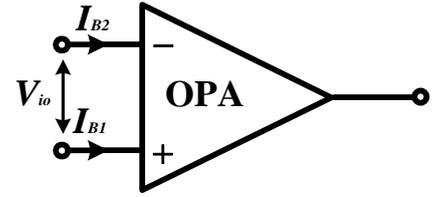
基本結構 圖(10-2-3)

5. 運算放大器的實際特性為：

(1). 『 $R_i \neq \infty$ 』 $\Rightarrow I_i \neq 0$ 。

A. R_i 值依採用不同材料約略不同：BJT 約 $10^6 \Omega$ ，JFET 約 $10^{12} \Omega$ ，MOSFET 約 $10^{15} \Omega$ 。

B. 輸入電流 $I_i \neq 0$ (即 $I_{B1} \neq 0$ 、 $I_{B2} \neq 0$)：如圖(10-2-4)所示



圖(10-2-4)

(A). 輸入抵補電流(I_{io})：當輸出電壓 $V_o = 0$ 時，流入 OPA 的兩輸入端之電流差值，即 $I_{io} = |I_{B1} - I_{B2}|$ 。

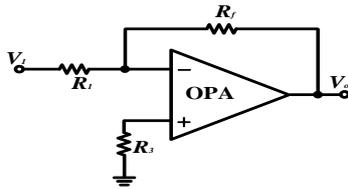
(B). 輸入偏壓電流(I_B)：由於 OPA 內部差動放大電路不對稱，當兩輸入端接地時，輸入端依舊有微量電流流入，兩輸入電流之平均值， $I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$ 稱為偏壓電流。

C. 如何消除偏壓電流(I_B)：

(A). 令 $V_i = 0$ ，

則 $V_o = 0$ 時，

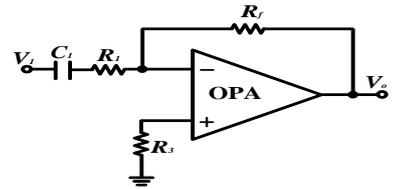
$$R_3 = R_1 // R_f$$



圖(10-2-5)

(B). 當直流時， C_1 視為開路，

$$R_3 = R_f$$



圖(10-2-6)

(2). 『 $R_o \neq 0$ 』 \Rightarrow 以實際值約 $25 \sim 100 \Omega$ 。

(3). 『 $A_{vo} \neq \infty$ 』 $\Rightarrow V_o \neq V_+$ 。

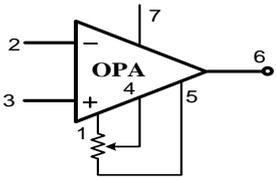
A. A_v 以實際值約 100dB (即 10^5 倍)。

B. 輸入抵補電壓(V_{io})：由於 OPA 內部差動放大電路不對稱或負載與電晶體不匹配，當 OPA 兩輸入端短路接地時，在輸入端可測量微小電壓。實際典型直在 $\pm 1\text{mV} \sim$ 數十 mV 。

C. 如何消除抵補電壓：

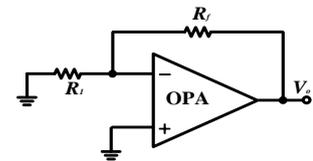
以 $\mu\text{A}741$ 為例，在 1、5 腳之間加上 $10\text{k}\Omega$ 之可變電阻(VR)來調整，使 $V_{io} = 0$ ，如圖(10-2-5)所示。

D. 當 $V_{io} \neq 0$ 時， V_o 與 V_{io} 的關係如圖(10-2-6)所示。



圖(10-2-5)

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_{io}$$



圖(10-2-6)

(4). 『B.W. $\neq \infty$ 』：

A. 頻寬以實際值為 $B.W. = \frac{0.35}{t_s}$ 。(t_s 為上升時間)

B. 轉動率(Slew Rate)：受到 OPA 內部頻率補償電容充電速度限制，輸出端電壓的變化有一最大的限制，該最大變化率稱為轉動率又稱為迴轉率，簡稱為 SR。

(A). SR 愈大，表示 OPA 反應速度越快。

(B). 若 v_o 為正弦波，即 $v_o = \sin(\omega t)(V)$ ，則 $f_{\max} = \frac{SR}{2\pi V_m}$ 。

$$SR = \left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max}$$

單位：V/ms 或 V/ μs

(5). 『 $CMRR \neq \infty$ 』 \Rightarrow 實際值為 $A_c = 100\text{dB}$ 以下。

(6). 因溫度變化而使特性改變，一般軍用級在 $-55^\circ\text{C} \sim +125^\circ\text{C}$ ，工業級在 $-25^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$ 。

(7). 供給電源電壓一般標準均設計在 $\pm 18\text{V}$ 。

(8). 散逸功率(P_o)：以 mW 為單位。

6. 理想運算放大器的二大觀念

(1). $\because Z_{in} = \infty \therefore i_- = i_+ = 0$ 。即 $i_{in} = 0$ 。

(2). $\because A_{vo} = \infty \therefore v_- = v_+ = 0$ 。即 $v_{in} = 0$ (虛短路特性或虛接地特性)

※10-3 反相放大器

1. 反相放大器如圖(10-3-1)所示電路。

分析：∵ $I_i=0$ 。 $V_{in}=0$ 。

$$\therefore I_f = I_1 - I_i = I_1$$

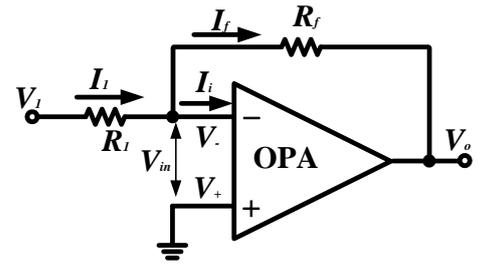
$$\frac{V_{in} - V_o}{R_f} = \frac{V_1 - V_{in}}{R_1}$$

$$\frac{0 - V_o}{R_f} = \frac{V_1 - 0}{R_1}$$

$$\frac{-V_o}{R_f} = \frac{V_1}{R_1}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_1} = -\frac{R_f}{R_1}$$

“-”負號代表輸出信號與輸入信號相位相反。



圖(10-3-1)

※10-4 非反相放大器

1. 非反相放大器如圖(10-4-1)所示電路。

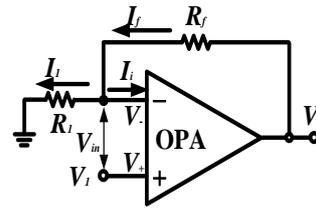
分析：∵ $I_i=0$ 。 $V_{in}=0$ 。

$$\therefore I_f = I_1 + I_i = I_1$$

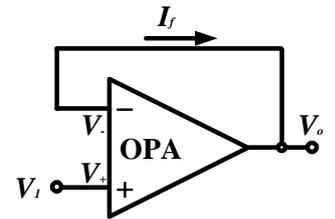
$$V_o = I_f \times R_f + I_1 \times R_1 = I_1 \times R_f + I_1 \times R_1 = I_1 \times (R_f + R_1)$$

$$V_1 = V_{in} + I_1 \times R_1 = I_1 \times R_1$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_1} = \frac{I_1 (R_1 + R_f)}{I_1 R_1} = \frac{R_1 + R_f}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$



圖(10-4-1)



圖(10-4-2)

2. 電壓隨耦器是一種電壓增益為1的非反相放大器，如圖(10-4-2)所示電路。隨耦器共同特性為高輸入阻抗、低輸出阻抗、電壓增益近乎於1、適合作阻抗匹配及緩衝級電路。

$$\text{分析：}\because R_f=0。R_1=\infty。 \therefore A_v = \frac{V_o}{V_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1 + 0 = 1$$

※10-5 和/差放大器

1. 反相加法器如圖(10-5-1)所示電路為兩輸入信號(V_1 , V_2)加法器。

分析：∵ $I_i=0$ 。 $V_{in}=0$ 。

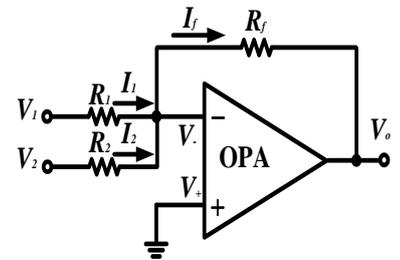
$$\therefore I_f + I_i = I_f = I_1 + I_2$$

$$\frac{V_{in} - V_o}{R_f} = \frac{V_1 - V_{in}}{R_1} + \frac{V_2 - V_{in}}{R_2}$$

$$\frac{0 - V_o}{R_f} = \frac{V_1 - 0}{R_1} + \frac{V_2 - 0}{R_2}$$

$$\frac{-V_o}{R_f} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}$$

$$V_o = -R_f \times \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right)$$



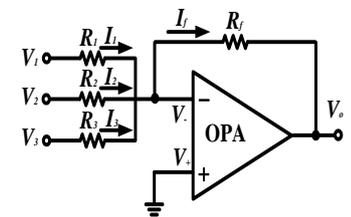
圖(10-5-1)

2. 反相加法器如圖(10-5-2)所示電路為三輸入信號(V_1 , V_2 , V_3)加法器。

分析：同兩輸入(V_1 , V_2)信號加法器之方法，其結果如下：

$$V_o = -R_f \times \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right) = \left(-V_1 \times \frac{R_f}{R_1} \right) + \left(-V_2 \times \frac{R_f}{R_2} \right) + \left(-V_3 \times \frac{R_f}{R_3} \right)$$

$$\text{若 } R_1=R_2=R_3=R \quad \text{則 } V_o = -\frac{R_f}{R} \times (V_1 + V_2 + V_3)$$



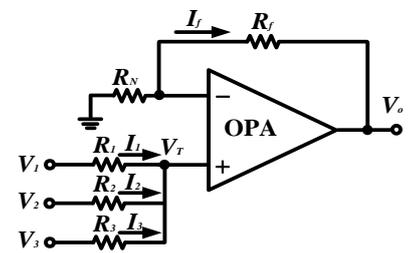
圖(10-5-2)

3. 非反相加法器如圖(10-5-3)所示電路為三輸入信號(V_1 , V_2 , V_3)加法器。

分析：利用密爾門定理求 V_T 值，其結果如下：

$$V_T = \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

$$V_o = V_T \times \left(1 + \frac{R_f}{R_N} \right)$$



圖(10-5-3)

4.減法器如圖(10-5-4)所示電路。利用重疊定理。

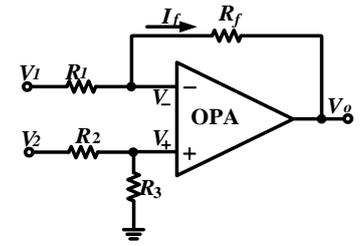
分析：(1).令 $V_2=0$ ， V_1 輸入求輸出 $V_{o1}=-V_1 \times \frac{R_f}{R_1}$ (反相放大器)

(2).令 $V_1=0$ ， V_2 輸入求輸出

$$V_{o2}=V_2 \times \left(\frac{R_3}{R_2+R_3} \right) \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) = V_2 \times \left(\frac{R_3}{R_2+R_3} \right) \left(\frac{R_1+R_f}{R_1} \right)$$

$$(3). V_o = V_{o1} + V_{o2} = V_2 \times \left(\frac{R_3}{R_2+R_3} \right) \left(\frac{R_1+R_f}{R_1} \right) - V_1 \times \frac{R_f}{R_1}$$

$$(4). \text{若 } \frac{R_f}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} = K, \text{ 則 } V_o = V_2 \times \left(\frac{K \times R_2}{R_2 + K \times R_2} \right) \left(\frac{R_1 + KR_1}{R_1} \right) - V_1 \times K = K \times (V_2 - V_1)$$



圖(10-5-4)

※10-6 微分/積分器

1.微分器如圖(10-6-1)所示電路。屬於高通濾波電路，較易受雜訊干擾。

(1).此電路為一反相微分器，其輸出信號電壓值為：

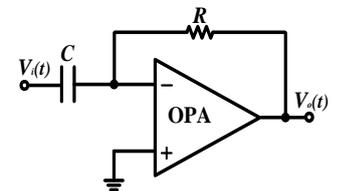
$$V_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$

(2).當時間常數 $\tau = RC \leq \frac{T}{10}$ 時，電路才具有微分功能。(T 為輸入信號週期)

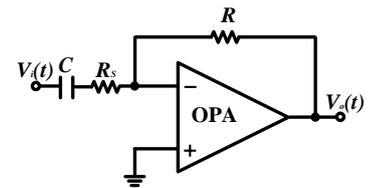
(3).波形變化如圖(10-6-3)所示。

(4).缺點：當 V_i 的頻率非常高時， X_c 甚小， $Av = \frac{R}{X_c}$ 趨近於 ∞ ，容易造成失真。改良方法如圖(10-6-2)所示電路。由於 R_s 的關係，電路增益變為 $(-\frac{R}{R_s + X_c})$ ，

即使高頻使 X_c 趨近於零，增益變為 $(-\frac{R}{R_s})$ ，亦不會使得輸出失真。



圖(10-6-1)



圖(10-6-2)

(5).如果要電路依舊保持微分電路的特性(不同頻率訊號放大倍數不同)，必須使輸入訊號的頻率小於截止頻率。

輸入波形	 三角波	 方波	 正弦波
輸出波形	 方波	 正負脈波	 餘弦波

圖(10-6-3)微分器輸入波形/輸出波形

2.積分器如圖(10-6-4)所示電路。

(1).此電路為一反相積分器，其輸出信號電壓值為：

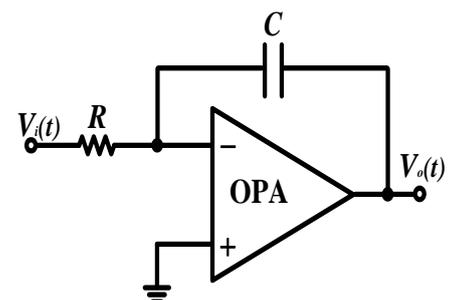
$$V_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_i(t) dt$$

(2).當時間常數 $\tau = RC \geq 10T$ 時，電路才具有積分功能。(T 為輸入信號週期)

(3).波形變化如圖(10-6-4)所示。

(4).缺點：當 V_i 的頻率太低時， X_c 趨近於 ∞ ， $Av = -\frac{X_c}{R}$ 趨近於 ∞ ，容易造

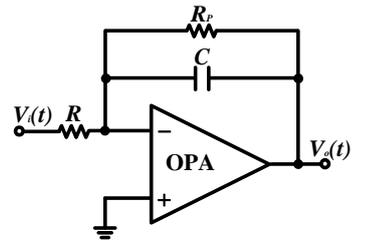
成失真。改良方法如圖(10-6-5)所示電路。由於 R_s 的關係，電路



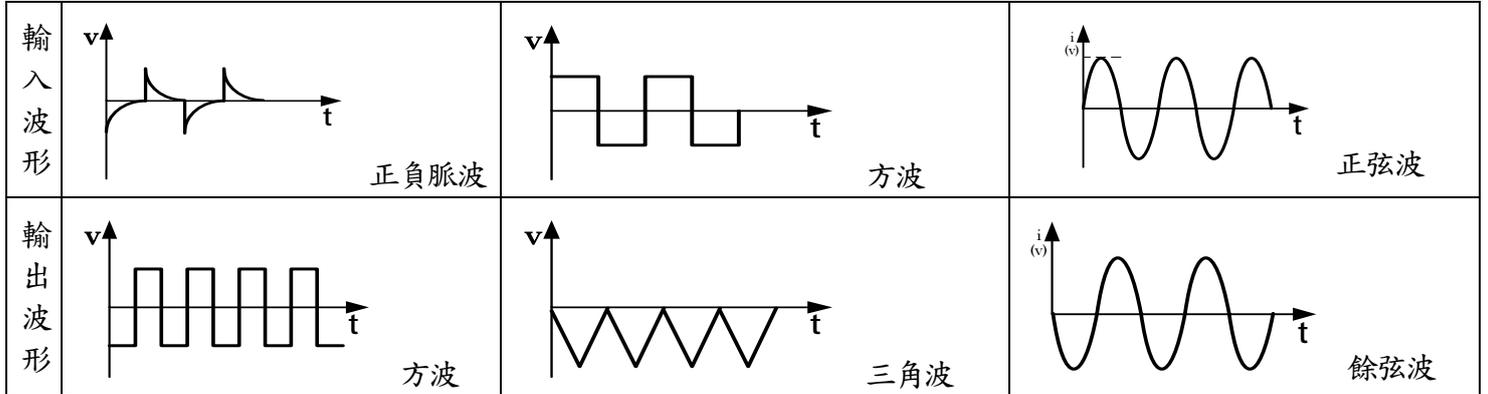
圖(10-6-4)

增益變為 $(-\frac{R_p // X_c}{R_p + X_c}) \times \frac{1}{R}$ ，即使低頻使 X_c 趨近於 ∞ ，增益變為 $(-\frac{R_p}{R})$ ，亦不會使得輸出失真。

(5).如果要電路依舊保持積分電路的特性(不同頻率訊號放大倍數不同)，必須使輸入訊號的頻率高於截止頻率。



圖(10-6-5)



圖(10-6-6)積分器輸入波形/輸出波形

※10-7 比較器

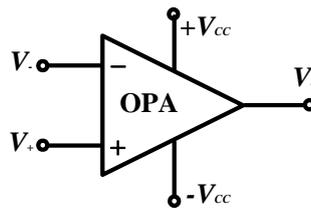
1.比較器為一開迴路之運算放大器，如圖(10-7-1)所示電路。

(1).若 $V_+ > V_-$ ，則 $V_o = +V_{sat}$ (正飽和電壓)。

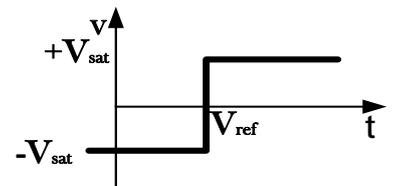
(2).若 $V_+ = V_-$ ，則 $V_o = 0$ 。

(3).若 $V_+ < V_-$ ，則 $V_o = -V_{sat}$ (負飽和電壓)。

(4).輸出波形如圖(10-7-2)所示。無論輸入波形為何，輸出波形均為方波或脈波。



圖(10-7-1)比較器



圖(10-7-2)輸出特性

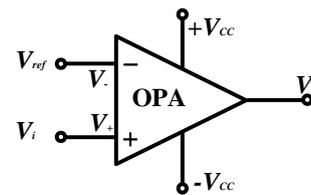
2.非反相輸入型比較器，如圖(10-7-3)所示電路。輸入端在非反相端，比較之參考電壓在反相端。

(1).若 $V_i > V_{ref}$ ($V_+ > V_-$)則 $V_o = +V_{sat}$ 。

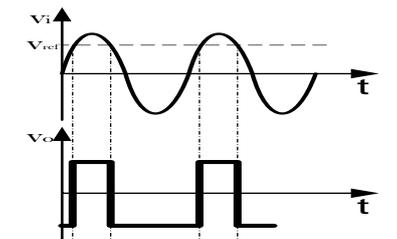
(2).若 $V_i = V_{ref}$ ($V_+ = V_-$)則 $V_o = 0$ 。

(3).若 $V_i < V_{ref}$ ($V_+ < V_-$)則 $V_o = -V_{sat}$ 。

(4).輸出波形如圖(10-7-4)所示。



圖(10-7-3)非反相輸入型



圖(10-7-4)輸入/輸出波形

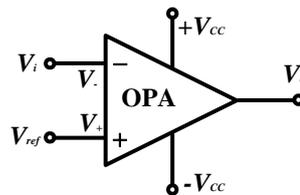
3.反相輸入型比較器，如圖(10-7-5)所示電路。輸入端在反相端，比較之參考電壓在非反相端。

(1).若 $V_i > V_{ref}$ ($V_- > V_+$)，則 $V_o = -V_{sat}$ 。

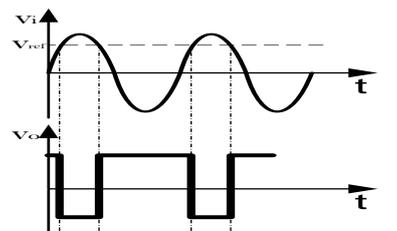
(2).若 $V_i = V_{ref}$ ($V_- = V_+$)，則 $V_o = 0$ 。

(3).若 $V_i < V_{ref}$ ($V_- < V_+$)，則 $V_o = +V_{sat}$ 。

(4).輸出波形如圖(10-7-6)所示。



圖(10-7-5)反相輸入型



圖(10-7-6) 輸入/輸出波形

4.臨界電位比較器，如圖(10-7-7)所示電路。利用重疊定理先求 V_- 值為：

$$V_- = V_i \times \frac{R_f}{R_i + R_f} + V_{ref} \times \frac{R_i}{R_i + R_f}$$

$$V_+ = 0$$

(1).若 $V_- > V_+$ 時，則 $V_o = -V_{sat}$ 。 $V_- = V_i \times \frac{R_f}{R_i + R_f} + V_{ref} \times \frac{R_i}{R_i + R_f} > 0$

$$\frac{1}{R_i + R_f} (V_i R_f + V_{ref} R_i) > 0 \quad V_i > -V_{ref} \times \frac{R_i}{R_f}$$

即當 $V_i > -V_{ref} \times \frac{R_i}{R_f}$ 時， $V_o = -V_{sat}$ 。

(2).若 $V_- = V_+$ 時，則 $V_o = 0$ 。

即當 $V_i = -V_{ref} \times \frac{R_i}{R_f}$ 時， $V_o = 0$ 。

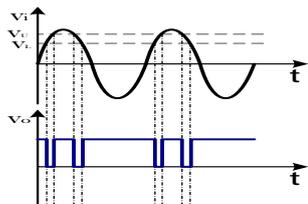
(3).若 $V_- < V_+$ 時，則 $V_o = +V_{sat}$ 。

即當 $V_i < -V_{ref} \times \frac{R_i}{R_f}$ 時， $V_o = +V_{sat}$

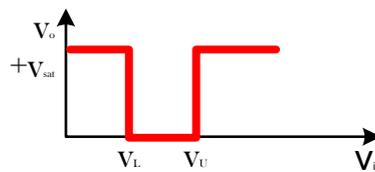
(4).輸出波形如圖(10-7-8)所示。

5.窗型比較器，如圖(10-7-9)所示電路。

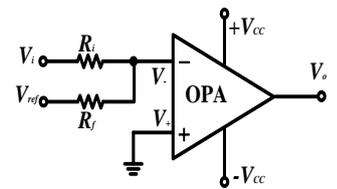
V_i 範圍	OPA1 輸出	OPA2 輸出	D_1	D_2	V_o
$V_i > V_U$	$+V_{sat}$	$-V_{sat}$	ON	OFF	V_{sat}
$V_U > V_i > V_L$	$-V_{sat}$	$-V_{sat}$	OFF	OFF	0
$V_i < V_L$	$-V_{sat}$	$+V_{sat}$	OFF	ON	V_{sat}



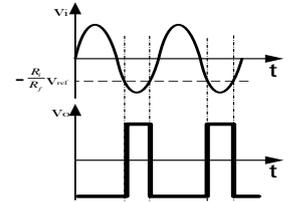
圖(10-7-10) 輸入/輸出波形



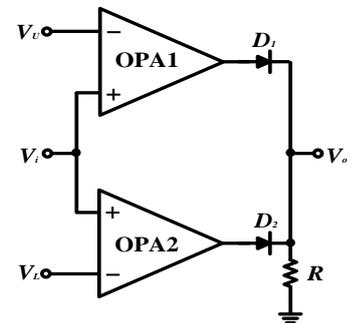
(10-7-11)轉換曲線



圖(10-7-7) 臨界電位比較器



圖(10-7-8) 輸入/輸出波形



圖(10-7-9) 窗型比較器

※10-8 其他應用電路

1.對數放大器

$$V_o = V_D, I_D = I_o(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1) = \frac{0 - V_i}{R} \quad \frac{-V_i}{R} + I_o = I_o e^{\frac{V_D}{\eta V_T}}$$

$$e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} = \frac{-V_i}{I_o R} + 1 \quad \frac{V_D}{\eta V_T} = \ln \left(1 - \frac{V_i}{I_o R} \right) V_o = \eta V_T \ln \left(1 - \frac{V_i}{I_o R} \right)$$

$$V_o = K_1 \ln (K_2 V_i)$$

可應用在乘/除法器。

2.指數放大器

$$V_o = -I_o \times R = -I_D \times R, V_i = V_D$$

$$V_o = -I_o(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1) \times R = -I_o(e^{\frac{V_i}{\eta V_T}} - 1) \times R$$

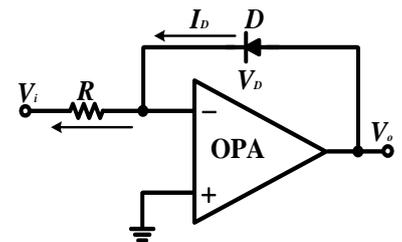
$$V_o = K_1 e^{K_2 V_i}$$

指數/對數放大器圖中之二極體方向可改變。

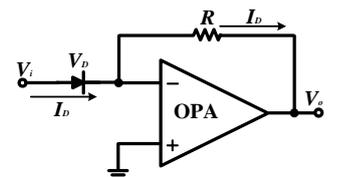
3.電流對電壓轉換電路

$$V_o = -I_s \times R_f$$

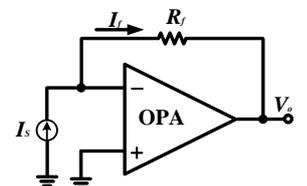
輸出電壓與輸入電流成正比，可用來偵測微弱的電流。



圖(10-8-1)對數放大器



圖(10-8-2)指數放大器

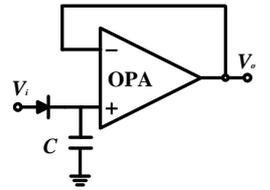


圖(10-8-3)電流對電壓轉換電路

4. 峰值檢波器： V_o 會等於輸入信號曾經出現過的最大值。

$$V_o = V_c$$

由於電容經由二極體快速充電至輸入信號 V_i 的峰值，而 OPA 為一電壓隨耦器，故 $V_o = V_c$ 。



圖(10-8-4) 峰值檢波器

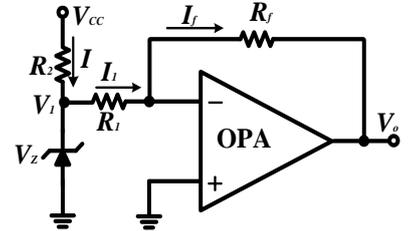
5. 定電流產生器

(1). 利用稽納二極體在逆向崩潰區之穩壓特性，來供給一個不受負載變化影響的恆定電流。

(2). 利用戴維寧等效電路求出加在稽納二極體的等效電壓 $V_{iz} = V_{cc} \times \frac{R_1}{R_2 + R_1}$ 。

(3). 判斷 V_{iz} 值：A. 若 $V_{iz} < V_z$ 則 $V_1 = V_{iz}$ 。 B. 若 $V_{iz} \geq V_z$ 則 $V_1 = V_z$ 。

$$V_o = -V_1 \times \frac{R_f}{R_1} \quad I_1 = I_f = \frac{V_z}{R_1} \text{ 因此負載電流 } I_f \text{ 由 } V_z \text{ 及 } R_1 \text{ 決定與 } R_L \text{ 無關}$$



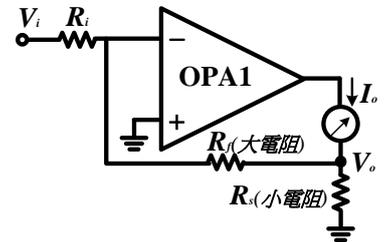
圖(10-8-5) 反相放大電路應用

6. 直流毫伏計

(1). 直流毫伏計是用以測量很低的直流電壓，由於電壓太小不能直接推動錶頭，必須加以放大後才能推動錶頭。

$$I_o = \frac{V_o}{R_f // R_s} \doteq \frac{V_o}{R_s} = \frac{-\frac{R_f}{R_i} \times V_i}{R_s} = \frac{1}{R_s} \left(-\frac{R_f}{R_i} \right) V_i$$

故電表指針偏轉度(與 I_o 成正比)與輸入電壓 V_i 成正比，因此可以測量輸入電壓。



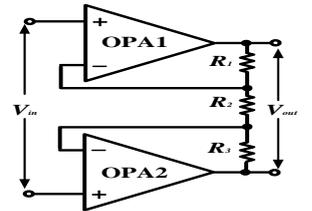
圖(10-8-6) 儀表放大電路

7. 儀表放大電路

(1). V_{in} 為 R_2 的壓降， $V_{in} = V_{out} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$ 。

$$\text{當 } R_1 = R_2 = R_3 = R \quad V_{in} = V_{out} \times \frac{R}{R + R + R} = V_{out} \times \frac{1}{3}$$

$$V_{out} = 3V_{in}$$



圖(10-8-7) 儀表放大電路

8. 以 T 型網路代替大電阻

(1). 假設 $R_1 = 1M\Omega$ 、 $R_2 = 1M\Omega$ 、 $R_3 = 1M\Omega$ 、 $R_4 = 10k\Omega$ 。

$$\therefore I_1 = \frac{V_1 - V_-}{R_1} = \frac{V_1}{1M\Omega} = I_2 = \frac{V_- - V_x}{1M\Omega} = \frac{-V_x}{1M\Omega} \quad \therefore V_x = -V_1$$

$$\therefore I_2 = I_3 + I_4$$

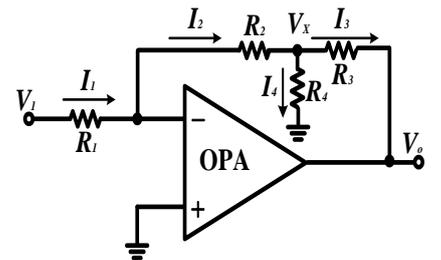
$$\therefore \frac{V_1}{1M\Omega} = \frac{V_x - V_o}{1M\Omega} + \frac{V_x}{10k\Omega} \quad \frac{V_1}{1M\Omega} = \frac{-V_1 - V_o}{1M\Omega} + \frac{-V_1}{10k\Omega}$$

"=" 號左右各乘以 $1M\Omega$ 得

$$V_1 = -V_1 - V_o + 100(-V_1)$$

$$V_o = -V_1 - V_1 - 100V_1 = -102V_1$$

$$\therefore A_V = \frac{V_o}{V_1} = \frac{-102 V_1}{V_1} = -102$$



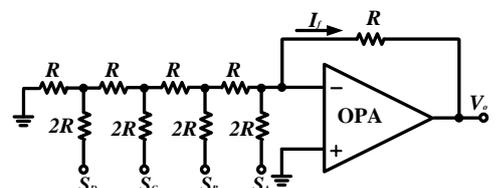
圖(10-8-8)

9. R-2R D/A 轉換電路

(1). S_A 為最高位元， S_D 為最低位元。(邏輯 1 電壓為 V_x ，邏輯 0 電壓為 0V)

(2). 先求 $S_A S_B S_C S_D$ 二進制轉換為十進制之值(D)。

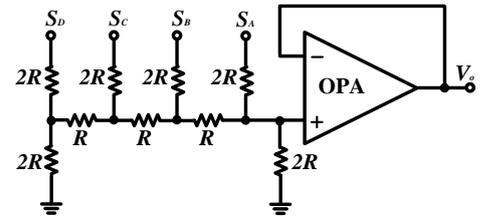
$$(3). V_o = -\frac{V_x}{16} \times D$$



圖(10-8-9) R-2R D/A 轉換電路

10. R-2R D/A 轉換電路

- (1). S_A 為最高位元, S_D 為最低位元。(邏輯 1 電壓為 V_X , 邏輯 0 電壓為 0V)
- (2). 先求 $S_A S_B S_C S_D$ 二進制轉換為十進制之值(D)。
- (3). $V_o = \frac{V_x}{24} \times D$



圖(10-8-10) R-2R D/A 轉換電路

※10-9 主動濾波電路

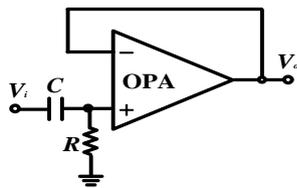
1. 主動濾波電路：濾波電路是把含有各種不同頻率之輸入訊號加以處理，使其某一部分頻率的輸入訊號產生大量的衰減，並使另一部分未被衰減或僅被少量衰減的訊號輸出，即能取得我們想要的頻率段的一種電路。主動濾波電路是將被動濾波電路配合主動元件所組成的濾波電路，又稱為有功濾波電路。
2. 主動元件：可提供功率放大的電路，如 OPA、電晶體、IC.....。
3. 被動元件：如電阻、電容、電感、變壓器.....。
4. 主動濾波電路的優點：

- (1). 提供增益使通過濾波電路的訊號不被衰減。
- (2). 高輸入阻抗與低輸出阻抗容易與其他電路隔離，防止負載效應。
- (3). 價格低廉。

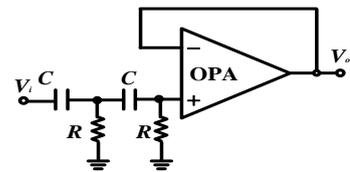
5. 常見的主動濾波電路

(1). 高通濾波器(HPF)

$$f_L = \frac{1}{2\pi RC}$$



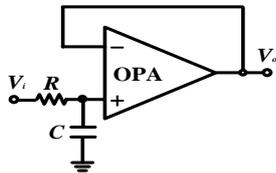
圖(10-9-1)一節濾波



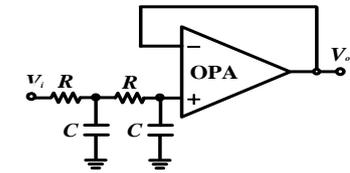
圖(10-9-2)二節濾波

(2). 低通濾波器(LPF)

$$f_H = \frac{1}{2\pi RC}$$



圖(10-9-3)一節濾波



圖(10-9-4)二節濾波

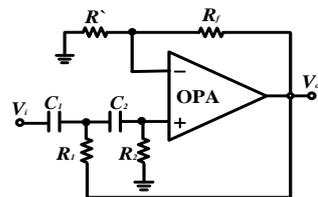
6. 特殊的二階濾波電路

(1). 高通濾波電路

$$f_L = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

當輸入信號頻率 $f_s > f_H$ 時

$$A_V = 1 + \frac{R_f}{R}$$



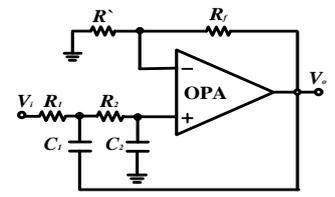
特殊的二階高通濾波電路

(2). 低通濾波電路

$$f_H = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

當輸入信號頻率 $f_s < f_H$ 時

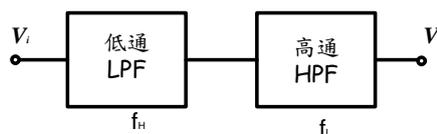
$$A_V = 1 + \frac{R_f}{R}$$



特殊的二階低通濾波電路

7. 帶通濾波電路(BPF)

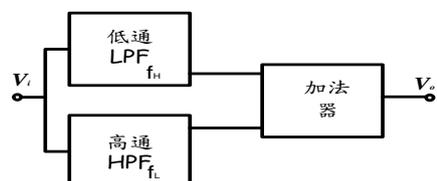
$$BW = f_H - f_L$$



圖(10-9-7) 帶通濾波電路

8. 帶拒濾波電路(凹口濾波電路)(BRF)

$$BW = f_H - f_L$$



圖(10-9-8) 帶拒濾波電路