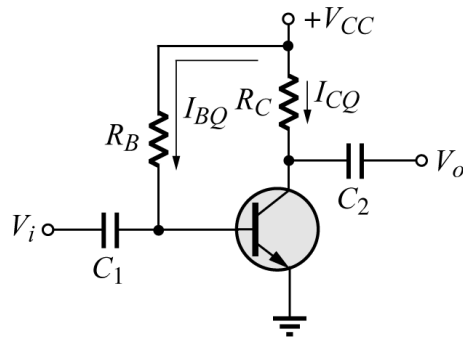


## 第七章 功率放大

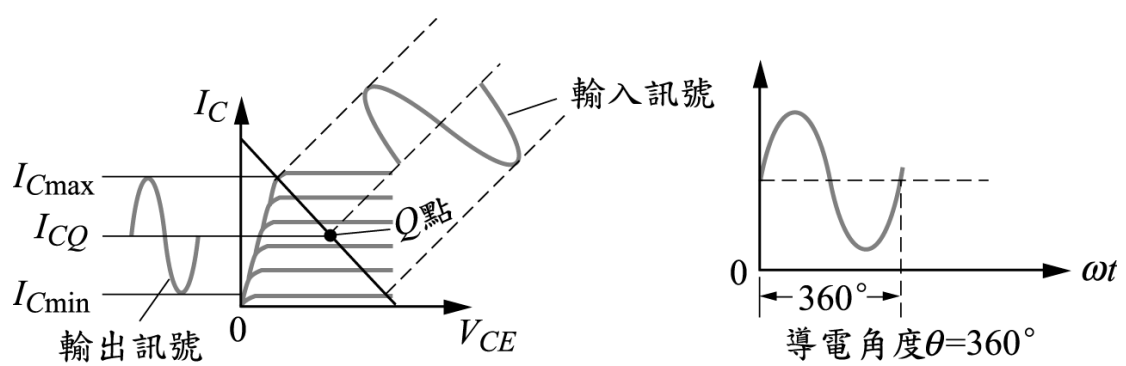
### § 7-1 A、B、AB 與 C 類放大器

一、A 類 ( class A , 甲類 ) 放大器：靜態工作點 (  $Q$  ) 在直流負載線的中央 ( 點 )

( 一 ) 電阻式負載的 A 類放大器



(a) 電路



(b)輸出特性

(c)輸出波形

特點：( 91 年 )

1、失真最小 ( 電晶體的導通角度為  $360^\circ$  )

2、效率最低  $\eta_{\max} = 25\%$  ( $V_{CEQ} = \frac{1}{2}V_{CC}$  ,  $I_{CQ} = \frac{1}{2}I_{C(sat)}$  )

EX：某 A 類放大器，若  $V_{CC}=20V$ ，負載  $R_L=10\Omega$ ，則此放大器最大輸出功率為何？ ( 89 年 )

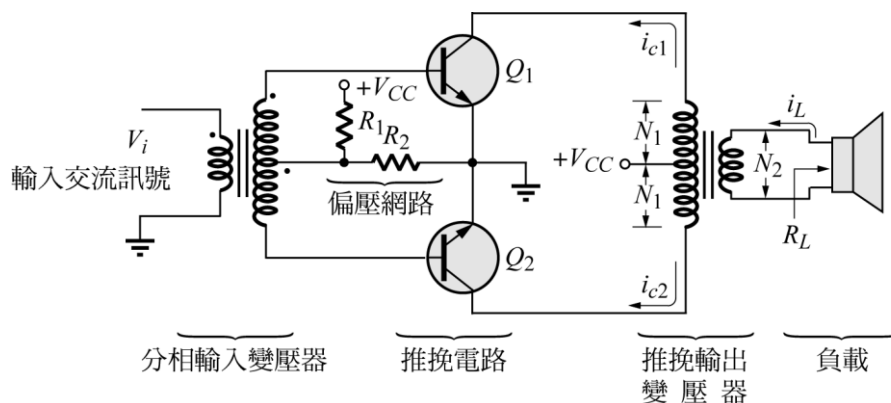
$$\text{Sol: } \because I_{CQ} = \frac{1}{2}I_{C(sat)} = \frac{1}{2} \times \frac{V_{CC}}{R_L}$$

$$\therefore P_{i(dc)} = V_{CC} \times I_{CQ} = V_{CC} \times \frac{V_{CC}}{2R_L} = 20 \times \frac{20}{2 \times 10} = 20(W)$$

由於 A 類放大器，當負載為電阻性時，其最高效率為 25%，

$$\text{所以 } P_{o(max)} = P_{i(dc)} \times 25\% = 20 \times 25\% = 5(W)$$

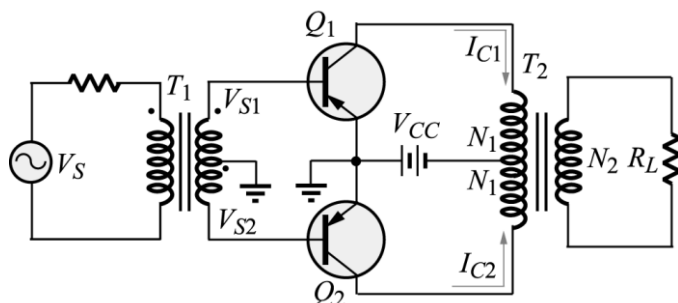
## (二) A 類推挽式放大器



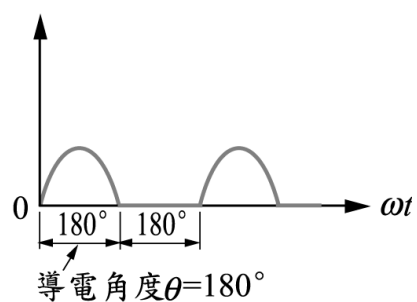
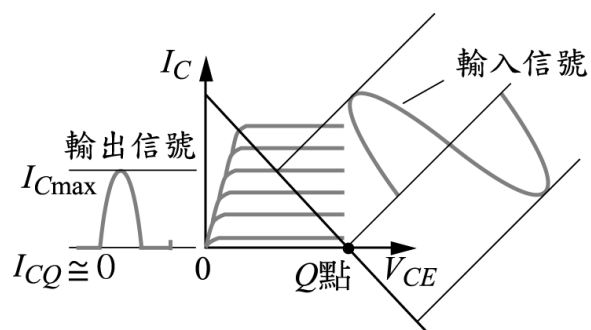
特點：

- 1、採用推挽式 ( push-pull ) → 消除偶次諧波失真。( 80 年 )
- 2、最高效率  $\eta_{\max} = 50\%$  。( 87 年 )
- 3、使用兩個電晶體，分別負責正負半週放大工作。

二、*B*類 ( class B , 乙類 ) 放大器：靜態工作點 ( *Q* ) 在截止點上



(a) 電路



(b)輸出特性

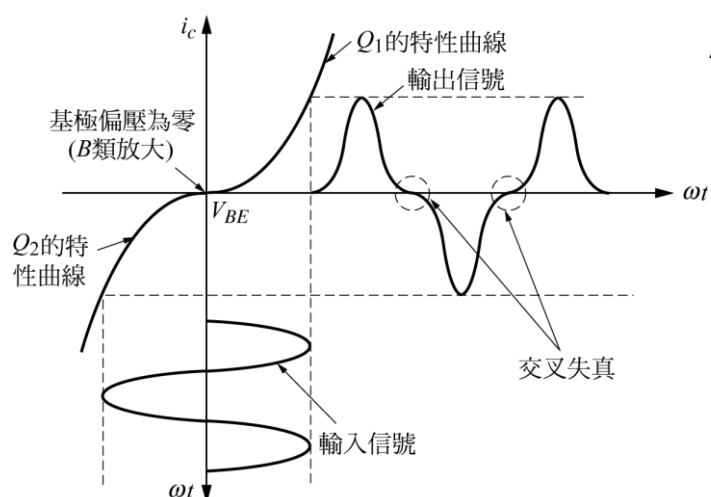
(c)輸出波形

特點：

- 1、導電角度  $180^\circ \rightarrow$  有如半波整流器。( 87 年 )
- 2、最高效率  $\eta_{\max} = \frac{\pi}{4} \cong 78.5\%$ 。( 84 年 )
- 3、 $I_{CQ}=0$
- 4、 $V_{CE} = V_{CC}$
- 5、採用推挽式 ( push-pull )  $\rightarrow$  消除偶次諧波失真。( 86 年 )
- 6、 $V_{BE} = 0 \rightarrow$  產生交叉 ( cross over ) 失真。( 90 年 )

交叉( cross over )失真:當輸入信號(  $V_i$  )在正、負半週交替時,由於  $V_i$  小於電晶

$V_{BE}$  的切入電壓,電晶體不導通(放大),因而產生一非線



性的失真現象。

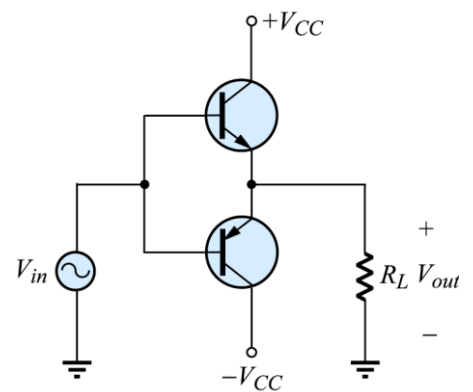
EX：如右圖  $B$  類推挽放大電路中， $R_L=5\Omega$ ，

若已知其最大輸出功率為  $10W$ ，則  $V_{CC}$  為多少？（89 年）

sol：因為  $V_{o(max)} = V_{CC}$ ，且  $P_o = \frac{V_{o(rms)}^2}{R_L}$ ，所以

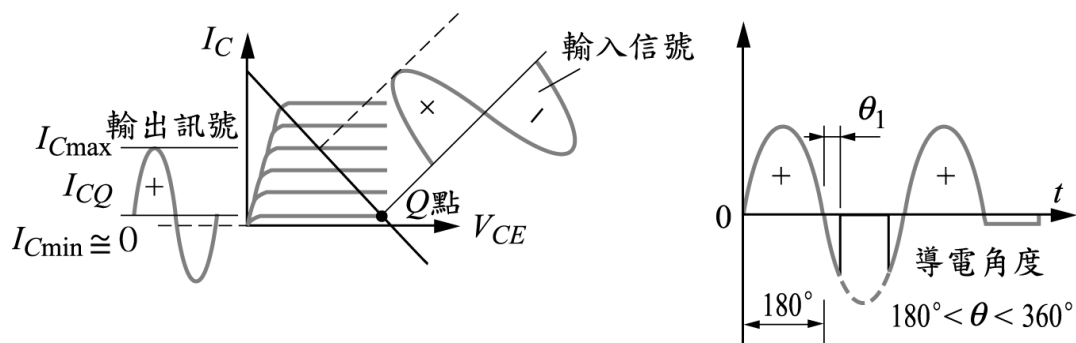
$$P_{o(max)} = \frac{\left(\frac{V_{o(max)}}{\sqrt{2}}\right)^2}{R_L} = \frac{\left(\frac{V_{CC}}{\sqrt{2}}\right)^2}{R_L}，即$$

$$10 = \frac{\left(\frac{V_{CC}}{\sqrt{2}}\right)^2}{5} = \frac{V_{CC}^2}{2 \times 5}，得 V_{CC}=10V$$



三、 $AB$  類 ( class  $AB$ ，甲乙類 ) 放大器：靜態工作點 (  $Q$  ) 在直流負載線中央至截止點間

將  $B$  類放大電路中兩電晶體的  $B-E$  接面加上少許順向偏壓，即構成  $AB$  類放大器



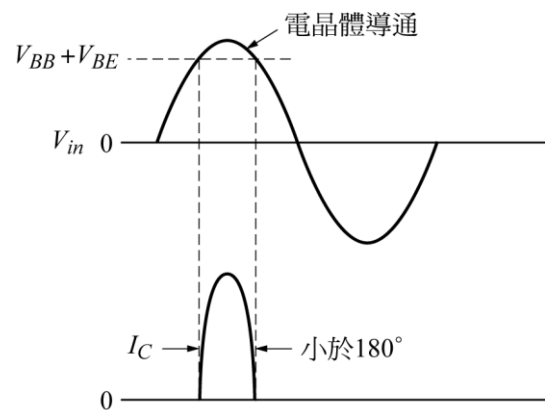
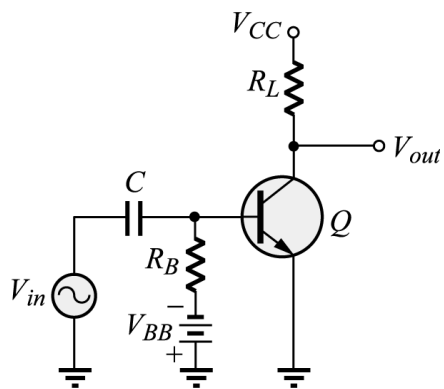
(a)輸出特性

(b)輸出波形

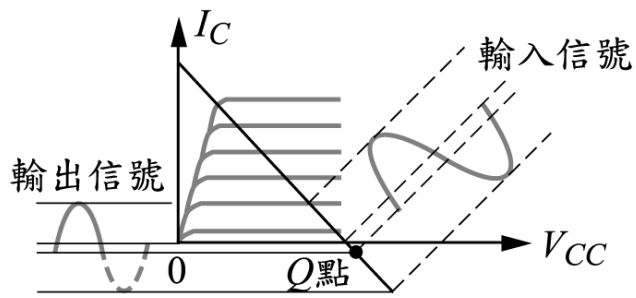
特點：

- 1、 可消除 B 類放大器所產生的交叉失真。( 81 年 )
- 2、 電晶體的導電 ( 通 ) 角度 (  $\theta$  )  $360^\circ > \theta > 180^\circ$  。
- 3、 失真與效率均介於 A 類 ( 50% ) 與 B 類 ( 78.5% ) 之間。( 88 年 )

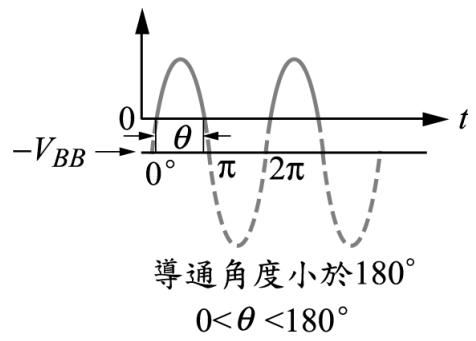
四、C類 ( class C , 丙類 ) 放大器：靜態工作點 (  $Q$  ) 在截止點以下



(a)電路



(b)輸出特性



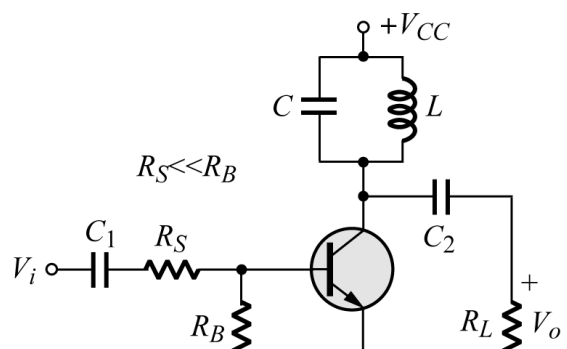
(c)輸出波形

特點：

- 1、失真最大 ( 電晶體的導通角度小於  $180^\circ$  )。( 91 年 )
- 2、效率最高。
- 3、作為諧波產生器或頻率倍增器。
- 4、不可用於高頻放大電路。

### 調諧 C 類放大器

基本 C 類放大器的輸出波形嚴重失真，不適合應用在線性放大方面，所以在實際應用時須加入一並聯諧振電路，使輸出波形可以還原成輸入波形。



$$\text{諧振頻率 } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

EX：如圖所示電路，若輸入信號為頻率等於 2.595MHz，

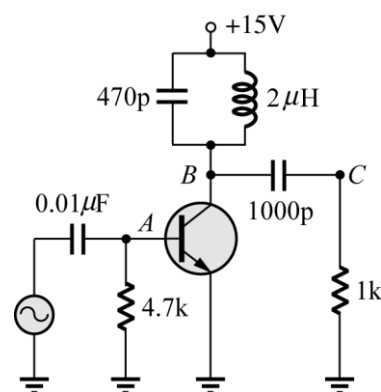
$\pm 5V$  之對稱正弦波；

( 87 年 )

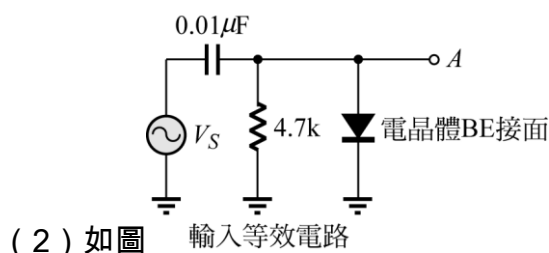
求 ( 1 ) 此一放大電路，為何類放大器？

( 2 ) 請問 A 點的波形及大小為何？

( 3 ) C 點輸出頻率為何？



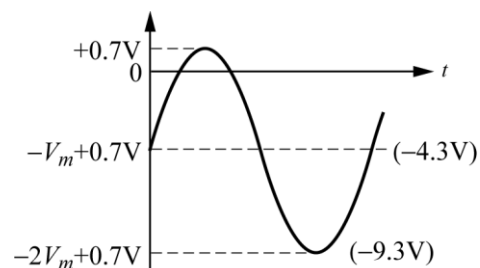
sol：( 1 ) C類放大器



( 2 ) 如圖 輸入等效電路 之輸入等效電

路，形成向下箝位之箝位電路，故 A 點的波形及大小

為：峰對峰值為 -9.3V 至 +0.7V 之對稱正弦波



( 3 ) 輸出部份為諧振電路，故

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \times 10^{-6} \times 470 \times 10^{-12}}} \approx 5.19 \text{ MHz}$$

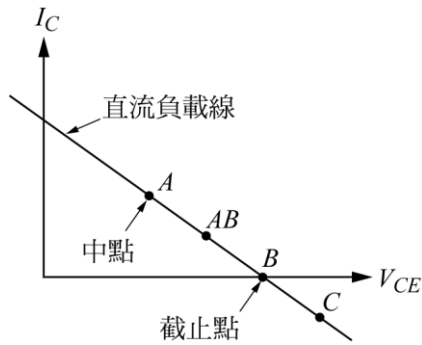


## 五、A類、B類、AB類與C類放大器的比較

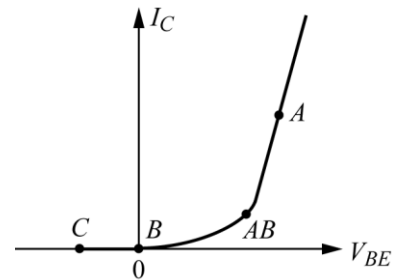
(1) 失真大小： $C > B > AB > A$

(2) 效率大小： $C > B > AB > A$

(3) 在直流負載線的工作點與 $V_{BE}$ 偏壓的大小關係圖



(a) 直流負載線的工作點



(b)  $V_{BE}$  偏壓的大小

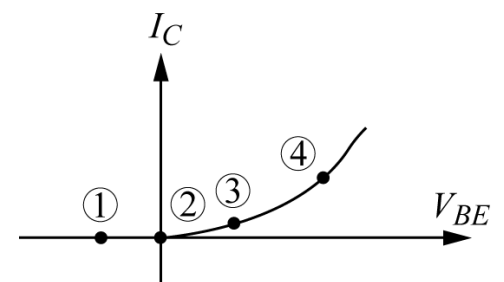
EX：圖中之點 1~4 將對應至 A 類、B 類、C 類及 AB 類功率放大

器的直流工作點在轉換特性曲線上的位置，對應關係各為

何？(86 年)

sol：若依  $V_{BE}$  偏壓的大小(以 NPN 為例)或集極靜態電流( $I_{CQ}$ )

的大小，皆為  $A > AB > B > C$



## § 7-2 OTL、OCL 放大器與放大器的失真

### 一、OTL 與 OCL 之比較

( 1 ) OTL ( Output Transformer-Less ) 放大器：無輸出變壓器的放大器

( 2 ) OCL ( Output Capacitor-Less ) 放大器：無輸出電容器的放大器

項 目 名 稱	OTL	OCL
中 點 電 壓	$\frac{1}{2}V_{CC}$	0V ( 調整困難 )
輸 出 端 大 電 容 器	有	無
電 源	單電源 ( $+V_{CC}$ )	雙電源 ( $\pm V_{CC}$ )
輸 入 電 壓 放 大 級	一般形式 ( $CE$ )	差動放大器
信 號 耦 合 方 式	$RC$ 耦合	直接耦合
頻 率 響 應	較 差	較 佳
抑 制 雜 音 能 力	較 差	較 佳
穩 定 性	較 差	較 佳
失 真	較 大	較 小
最 大 輸 出 功 率	$P_o = \frac{V_{cc}^2}{8R_L}$	$P_o = \frac{V_{cc}^2}{2R_L}$

EX：一 OTL 電子電路使用之  $DC$  電源電壓 64V，喇叭阻抗為  $8\Omega$ ，則最大輸出功率為多少瓦特？

sol：OTL 放大器使用單電源，其最大輸出功率  $P_{o(max)}$  為

( 82 年 )

$$P_{o(max)} = \frac{V_{cc}^2}{8R_L} = \frac{64^2}{8 \times 8} = 64(W)$$

### 二、放大器的失真

(1) 波幅失真。

(2) 頻率失真。

(3) 相位失真。

(4) 互調失真。

(5) 交叉失真 ( 波幅放大非線性 ) 與互調失真 ( 產生新頻率 ) 皆屬於波幅失真的一種。

(6) 總諧波失真  $D_T$

$$D_T = \sqrt{D_2^2 + D_3^2 + D_4^2 + \dots}$$

( 其中  $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$ ...分別稱為二次、三次、四次...諧波失真百分率 )

EX：有一放大器的信號主波為 1V，二次諧波為 30mV，三次諧波為 40mV ( 以上電壓值均為有效值 )，若四次以上諧波失真可忽略，則此放大器的總諧波失真為多少？ ( 84

年 )

$$\text{sol：(1)二次諧波失真百分率 } D_2 = \frac{\text{二次諧波}}{\text{信號主波}} \times 100\% = \frac{30\text{mV}}{1\text{V}} \times 100\% = 3\%$$

$$\text{三次諧波失真百分率 } D_3 = \frac{\text{三次諧波}}{\text{信號主波}} \times 100\% = \frac{40\text{mV}}{1\text{V}} \times 100\% = 4\%$$

$$\text{總諧波失真百分率 } D_T = \sqrt{D_2^2 + D_3^2 + \dots} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5\% = 0.05$$

EX：某功率放大器在示波器上所顯示的波形值為  $V_{CE, \min} = 1\text{V}$ ， $V_{CE, \max} = 20\text{V}$ ， $V_{CEQ} = 10\text{V}$ ，則其二次諧波失真的百分比為多少？

( 91 年 )

$$\text{sol：二次諧波失真率 } D_2 = \left| \frac{\frac{1}{2}(V_{CE, \max} + V_{CE, \min}) - V_{CEQ}}{V_{CE, \max} - V_{CE, \min}} \right| \times 100\%$$

$$\text{若以輸出電流波形計算，則 } D_2 = \left| \frac{\frac{1}{2}(I_{C, \max} + I_{C, \min}) - I_{CQ}}{I_{C, \max} - I_{C, \min}} \right| \times 100\%$$

$$\text{所以 } D_2 = \left| \frac{\frac{1}{2}(20+1) - 10}{20-1} \right| \times 100\% = 2.6\%$$

## 第八章 運算放大器 ( I )

### § 8-1 差動放大器

#### 一、差動放大器的基本概念

##### 1、差動放大器 ( differential amplifier, DA )

主要作用：放大兩個輸入信號之差 (  $V_d$  )。

排拒雜訊 (  $V_c$  , 共同信號 ) 干擾。

##### 2、共模拒斥比 ( common-mode rejection ratio , CMRR )

定義：用來判斷排斥共同訊號 ( 雜訊 ) 的能力

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

其中  $A_d$  ( 差模增益 ) : 理想差動放大器只放大不同訊號  $\rightarrow A_d$  越大越好。

$A_c$  ( 共模增益 ) : 理想差動放大器不放大共同訊號  $\rightarrow$  理想  $A_c = 0$  。

※ 理想的 CMRR 值是無限大

EX：某差動放大器，差模訊號電壓增益  $A_d$  為 200，而共模拒斥比  $CMRR=80dB$ ，試求其共模訊

號電壓增益  $A_c$  為何？

( 89

年 )

$$\text{Sol: } CMRR = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

$$80 = 20 \log \frac{200}{A_c} \quad \therefore 4 = \log \frac{200}{A_c}, \quad \text{故} \quad A_c = \frac{200}{10^4} = 0.02$$

##### 3、差動放大器的輸出電壓 $V_o$ 為

$$V_o = A_d V_d + A_c V_c$$

$$= A_d V_d \left( 1 + \frac{1}{CMRR} \frac{V_c}{V_d} \right)$$

其中

(1)  $V_d$  ( 差模信號 ) : 不同的信號 ( 欲放大的信號 )

$$V_d = V_{i1} \text{ ( 大 )} - V_{i2} \text{ ( 小 )}$$

(2)  $V_c$  ( 共模信號 ) : 相同的信號 ( 雜訊等干擾的信號 )

$$V_c = \frac{V_{i1} + V_{i2}}{2}$$

EX : 假設放大器之差動增益為  $A_d=1000$  ,  $CMRR=100$  , 試計算輸入電壓  $V_{i1}=75\mu V$  ( 非反向輸入端電壓 ) ,  $V_{i2}=25\mu V$  ( 反向輸入端電壓 ) 時之差動放大器的輸出電壓為何 ? ( 89

年 )

Sol : (1)  $V_d = V_{i1} - V_{i2} = 75 - 25 = 50(\mu V)$

$$V_c = \frac{V_{i1} + V_{i2}}{2} = \frac{75 + 25}{2} = 50(\mu V)$$

$$\begin{aligned} (2) V_o &= A_d V_d \left( 1 + \frac{1}{CMRR} \frac{V_c}{V_d} \right) \\ &= 1000 \times 50 \left( 1 + \frac{1}{100} \times \frac{50}{50} \right) \\ &= 50.5 \times 10^3 (\mu V) = 50.5 (mV) \end{aligned}$$

EX : 差動放大器輸入電壓為  $V_{i1}=140\mu V$  ,  $V_{i2}=60\mu V$  時 , 其輸出電壓  $V_o=81mV$  , 輸入電壓為

$V_{i1}=120\mu V$  ,  $V_{i2}=80\mu V$  時 , 其輸出電壓  $V_o=41mV$  , 試求該放大器之共模拒斥比 (  $CMRR$  )

為何 ? ( 90 年 )

Sol:  $V_o = A_d V_d + A_c V_c$

(A) 當  $V_{i1}=140\mu V$  ,  $V_{i2}=60(\mu V)$

則  $V_d = V_{i1} - V_{i2} = 140 - 60 = 80(\mu V)$

$$V_c = \frac{V_{i1} + V_{i2}}{2} = \frac{140 + 60}{2} = 100(\mu V)$$

所以  $81 \times 10^3 = A_d \times 80 + A_c \times 100 \cdots \cdots (1)$

(B) 當  $V_{i1}=120\mu V$  ,  $V_{i2}=80(\mu V)$

則  $V_d = V_{i1} - V_{i2} = 120 - 80 = 40(\mu V)$

$$V_c = \frac{V_{i1} + V_{i2}}{2} = \frac{120 + 80}{2} = 100(\mu V)$$

$$\text{所以 } 41 \times 10^3 = A_d \times 40 + A_c \times 100 \cdots \cdots (2)$$

(C)由(1)、(2)式聯立可得

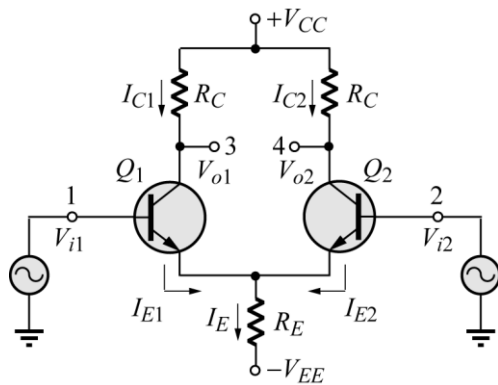
$$\begin{cases} 81 \times 10^3 = 80A_d + 100A_c \cdots \cdots (3) \\ 41 \times 10^3 = 40A_d + 100A_c \cdots \cdots (4) \end{cases}$$

$$A_d = 1000, A_c = 10$$

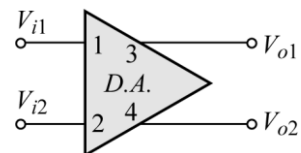
$$(D) \text{共模拒斥比 } CMRR = \frac{A_d}{A_c} = \frac{1000}{10} = 100$$

## 二、差動放大器的直交流分析

電路由兩個特性一樣的電晶體 (  $Q_1$ 、 $Q_2$  )，與兩個阻值一樣的集極電阻 (  $R_c$  )，加上一個共用的射極電阻 (  $R_E$  ) 所組成



(a)基本電路



(b)符號

### 1、差動放大器的直流分析

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E}$$

由於  $Q_1 = Q_2$ ， $R_{c1} = R_{c2}$

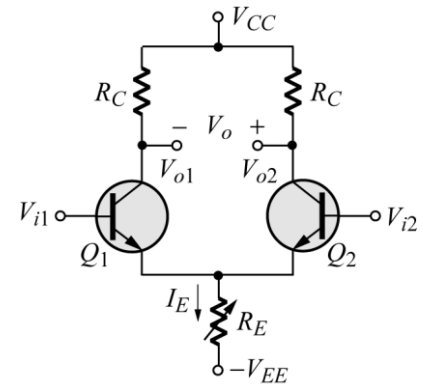
$$\text{故 } I_{E1} = I_{E2} = \frac{I_E}{2} \cong I_{C1} = I_{C2}$$

$$V_{O1} = V_{O2} = V_{CC} - I_{C1} \times R_C = V_{CC} - I_{C2} \times R_C$$

EX：如右圖  $Q_1$  與  $Q_2$  完全對稱，且  $V_{I1} = V_{I2}$ ，則在正常的運作下將

$R_E$  阻值調高的影響為何？

( 92 年 )



Sol：  $R_E \uparrow \rightarrow I_E \downarrow$  (即  $I_{E1} \downarrow$  與  $I_{E2} \downarrow$ )

$\rightarrow I_{C1} \downarrow$  與  $I_{C2} \downarrow$  (  $\because I_{E1} \downarrow$  、  $I_{E2} \downarrow$  )

$\rightarrow V_{O1} \uparrow$  與  $V_{O2} \uparrow$

但  $V_O (=V_{O2} - V_{O1})$  不變

## 2、差動放大器的交流分析

### (1) 差模增益

$$A_d = \frac{V_O}{V_d} \cong \frac{-h_{fe} R_C}{2h_{ie}} \cong \frac{-R_C}{2r_e}$$

### (2) 共模增益

$$A_c = \frac{V_O}{V_c} \cong \frac{-R_C}{2R_E}$$

(3) 當  $R_E \uparrow$ ，則  $A_c \downarrow$ ，而  $CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$  愈大，愈能排斥共同的信號。( 88 年 )

但  $R_E$  愈大時，將造成電晶體電流過小，無法正常 ( 在線性區 ) 工作

$\rightarrow R_E$  常以定電流源取代 ( 因為定電流源內阻近似  $\infty$ ，且又有固定電流 )。

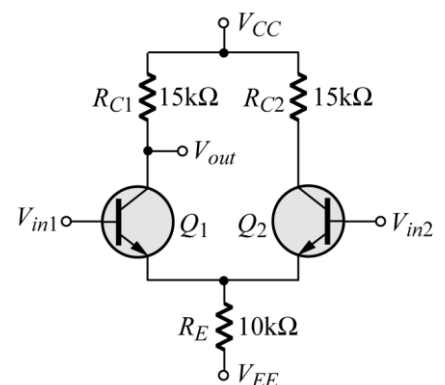
EX：如右圖電路，假設電晶體之  $h_{fe} = \beta = 60$ ， $h_{ie} = r_{\pi} = 3k\Omega$ ，當

電

路採雙端輸入、單端輸出時，其共模拒斥比 ( CMRR ) 約

為多少？

( 91 年 )



sol: 差模增益  $A_d \doteq -\frac{h_{fe} R_C}{2h_{ie}} = -\frac{60 \times 15k}{2 \times 3k} = -150$

$$\text{共模增益 } A_c \doteq -\frac{R_C}{2R_E} = -\frac{15k}{2 \times 10k} = -\frac{3}{4}$$

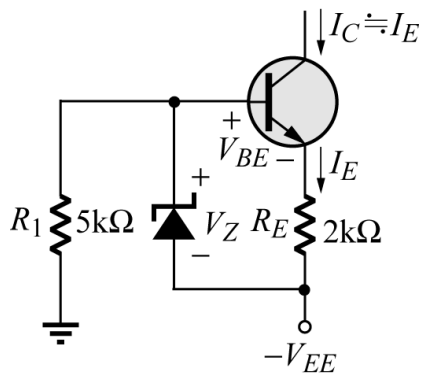
$$\text{共模拒斥比 (CMRR)} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \left| \frac{-150}{-\frac{3}{4}} \right| = 200$$

### 3. 定電流源與電流鏡

(1) 差動放大器為獲得高  $CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$  值

→ 將射極電阻 ( $R_E$ ) 改成電流源 (內阻為 $\infty$ )。 (88、89 年)

(2) 電流為定值→應用齊納二極體

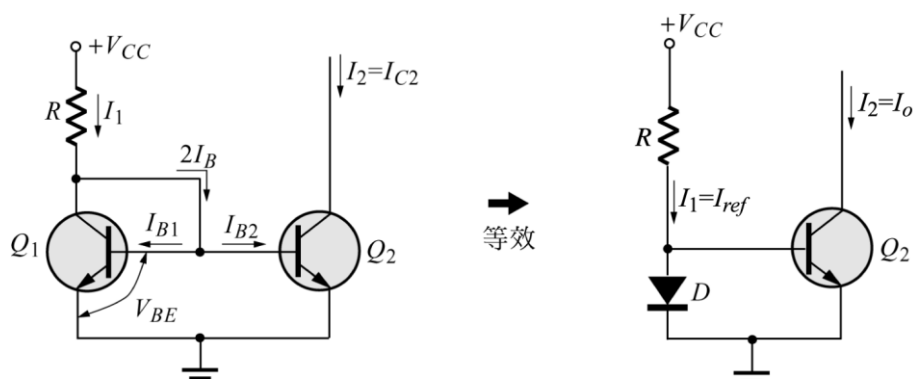


$$V_Z = V_{BE} + I_E R_E$$

$$I_E = \frac{V_Z - V_{BE}}{R_E} = \text{定值}$$

(3) 電流鏡 (current mirror)

1、一般電流鏡

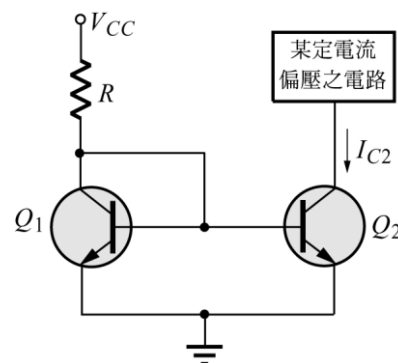




$$\frac{I_0(\text{反射電流})}{I_r(\text{參考電流})} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{\beta I_{B2}}{\beta I_{B1} + 2I_{B1}} = \frac{\beta I_B}{\beta I_B + 2I_B} = \frac{\beta}{\beta + 2} \quad (91 \text{ 年})$$

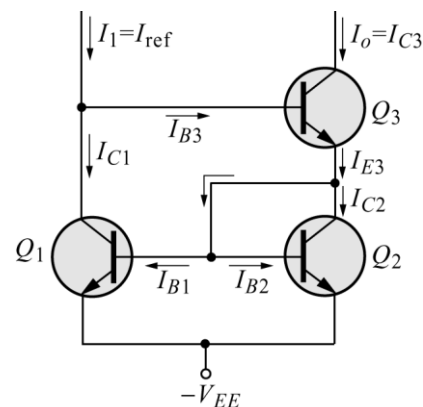
$R=2\text{k}\Omega$ ，且  $Q_1$  的特性與  $Q_2$  相同，則  $I_{C2}$  之電流大小約為？

$$\begin{aligned} \text{Sol : } \because I_{C2} &\cong I_R = \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{R} && (85, 86 \text{ 年}) \\ &= \frac{5 - 0.7}{2k} \\ &= 2.15(\text{mA}) \end{aligned}$$



$Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$  為特性完全相同的電晶體

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{(\beta + 1)I_B}{(\beta + 1)I_B} = 1$$



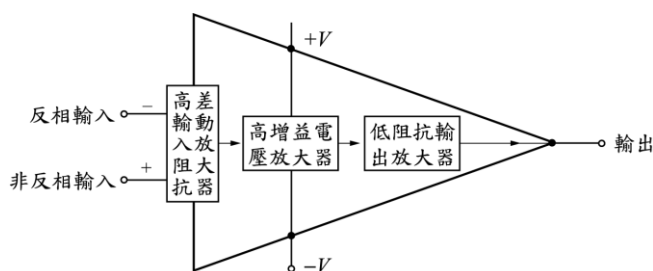
## § 8-2 OPA 的基本概念

### 一、理想 OPA 的特性 ( 83、86、87、88 年 )

- (1) 輸入阻抗為無限大 (  $R_i \rightarrow \infty$  )。
- (2) 輸出阻抗為零 (  $R_o \rightarrow 0$  )。
- (3) 開迴路增益 ( open loop gain ) 為無限大 (  $A_{v0} \rightarrow \infty$  )。
- (4) 頻帶寬度為無限大 (  $BW \rightarrow \infty$  )。
- (5) 共模拒斥比為無限大 (  $CMRR \rightarrow \infty$  )。

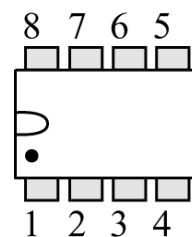
### 二、常用符號與包裝接腳

#### 1、符號



#### 2、DIP ( 雙排式 ) 型包裝接腳 ( 以 $\mu A 741$ 為例 ) ( 90 年 )

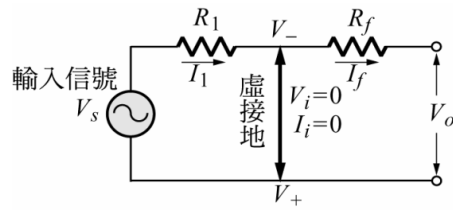
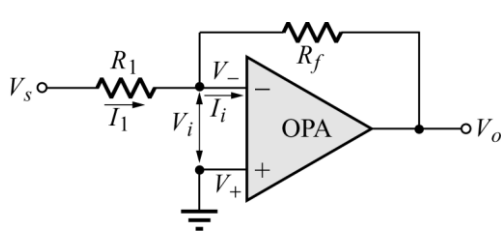
- (1) 第 1、5 腳：抵補電壓調整 ( 83、91 年 )
- (2) 第 2 腳：反相輸入端 ( 84 年 )
- (3) 第 3 腳：非反相輸入端
- (4) 第 4 腳：負電源 ( 83 年 )
- (5) 第 6 腳：輸出端 ( 81、86、92 年 )



(6)第 7 腳：正電源 ( 83 年 )

(7)第 8 腳：空腳

### 三、虛接地 ( Virtual Ground )



( 1 )  $V_+ = V_-$

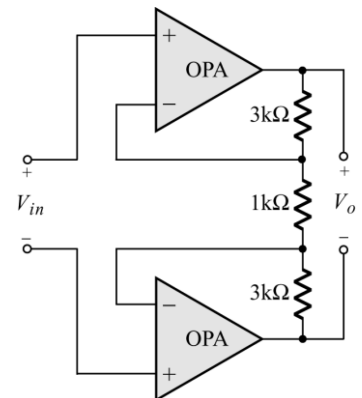
( 2 )  $I_i = 0$

EX：如右圖電路，為一儀表放大器 ( Instrumentation Amplifier )，

其電壓增益  $\frac{V_o}{V_{in}}$  為何？ ( 88 年 )

sol：  $V_{in} = V_{1k} = V_o \times \frac{1k}{3k + 1k + 3k}$

$$A_v = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_o}{\frac{1k}{3k + 1k + 3k} V_o} = \frac{3k + 1k + 3k}{1k} = 7$$



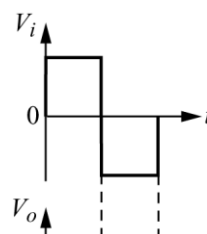
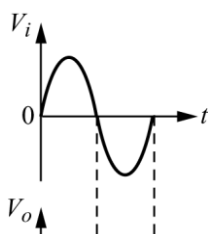
### 四、變動率 ( Slew Rate , SR ) 與頻寬 ( BW )

(1) 變動率 ( SR，又稱為迴轉率、扭轉率 )

當輸入電壓變動時，輸出電壓所產生的最大變化率。

單位：V/ $\mu$ S

若輸入信號的頻率過高，超過 SR 所能反應的速度，將致使輸出波形失真。



(2) 全功率頻率 ( 寬 )

$$SR = 2\pi f_{(\max)} \cdot V_{o(\max)}$$

其中  $f_{(\max)}$  : OPA 所能輸入之最高頻率 ; 若輸入信號頻率超出此頻率 , 則輸出波形將會產生失真。

$V_{o(\max)}$  : OPA 輸出正弦波的峰值電壓 , 當  $V_o$  為最大值時 , 稱為全功率 ( Full-Power ) 頻率 ( 寬 )

EX : 某一運算放大器之轉動率  $SR = 0.6V/\mu S$  , 若此運算放大器之輸出電壓峰對峰值為 10V ; 則此運算放大器在輸出不允許失真的狀況下 , 輸入所能允許正弦波之最高頻率約為何 ? ( 90 年 )

Sol :  $\because SR = 2\pi f_{(\max)} \cdot V_{o(\max)}$

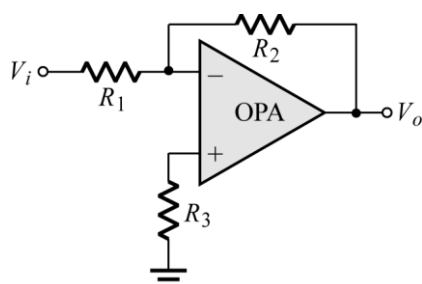
$$\therefore 0.6 \times 10^6 = 2\pi f_{(\max)} \times \frac{10}{2}$$

$$\rightarrow f_{(\max)} \doteq 19 \times 10^3 (\text{Hz}) = 19 (\text{kHz})$$

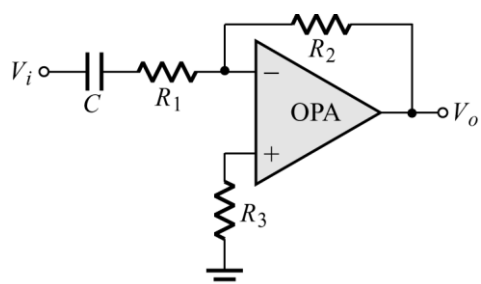
五、OPA 輸入偏壓電流  $I_B$  的補償 ( 消除 )

於非反相輸入端加一電阻  $R_3$  → 減低 OPA 輸入偏壓電流對輸出的影響

( 1 ) ( 83、88 年 )



( 2 ) ( 83、91 年 )

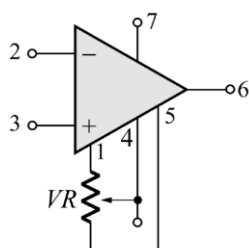


$$R3=R1//R2$$

$$R3=R2 \quad (\because C \text{ 在直流視為 } \infty)$$

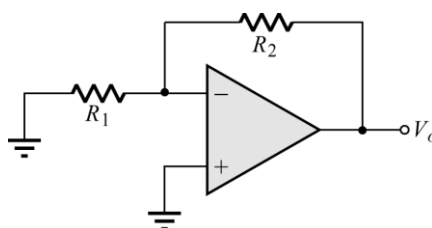
## 六、OPA 輸入抵補電壓 $V_{io}$ 的補償 (消除)

(1) 以  $\mu A 741$  的 IC 為例，在 1、5 腳間接上  $10k\Omega$  的可變電阻 ( $V_R$ ) 來調整  $\rightarrow$  使  $V_{io}=0$



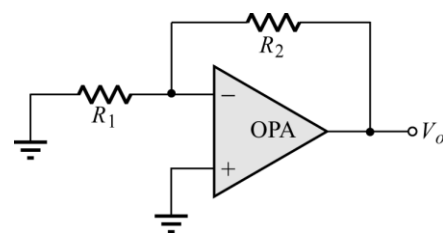
(2) 反相、非反相輸入端均無輸入電壓，而  $V_{io} \neq 0$  時 (輸入抵補電壓引起)

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times V_{io}$$



EX：如圖電路，若  $R_1=1k\Omega$ ， $R_2=10k\Omega$ ， $V_o=0.11V$ ，則其輸入

抵



補電壓 (Input Offset Voltage) 為何？

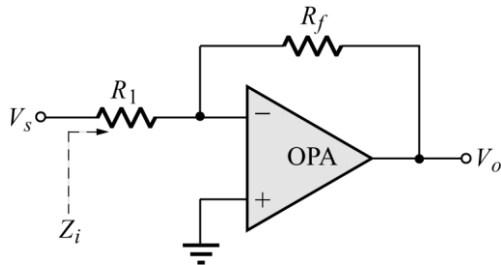
(88 年)

Sol ;  $V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times V_{io}$

$$0.11 = \left(1 + \frac{10k}{1k}\right) \times V_{io} \rightarrow V_{io} = 0.01V = 10mV$$

## § 8-3 OPA 反相 ( 倒相 ) 放大器

### 一、( 基本 ) 反相放大器



(1)  $A_v = \frac{V_o}{V_s} = -\frac{R_f}{R_1}$  ( 負號表示  $V_o$  與  $V_i$  相差  $180^\circ$  或反相 )。

(2) 輸出電壓 (  $V_o$  ) 不受負載的影響，即  $V_o = A_v \times V_s$ 。

(3)  $Z_i \approx R_1$  (  $Z_i$  為電路的輸入阻抗 )。

(4) 輸出飽和時的狀態

a、 $V_o = V_{o(sat)} = \pm V_{CC}$

b、 $V \neq V_A$  虛接地觀念不適用

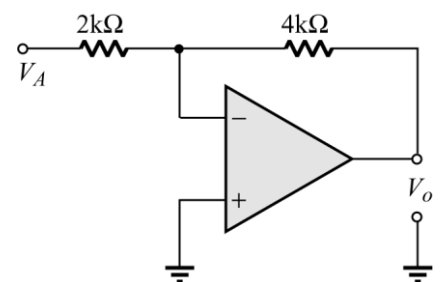
EX：如右圖所示的電路，運算放大器的飽和電壓為  $\pm 12V$ ，

求 ( 1 ) 當  $V_A = +5V$ ，則  $V_o =$  \_\_\_\_\_ V

( 2 ) 當  $V_A = -5V$ ，則  $V_o =$  \_\_\_\_\_ V

( 3 ) 當  $V_A = +2V$ ，則  $V_o =$  \_\_\_\_\_ V

( 4 ) 當  $V_A = -2V$ ，則  $V_o =$  \_\_\_\_\_ V ( 92 年 )



sol : (1)若  $V_A = +5V$  , 則  $V_o = -\frac{4k}{2k} \times V_A = (-2) \times (+5) = -10(V)$

(2)若  $V_A = -5V$  , 則  $V_o = -\frac{4k}{2k} \times V_A = (-2) \times (-5) = 10(V)$

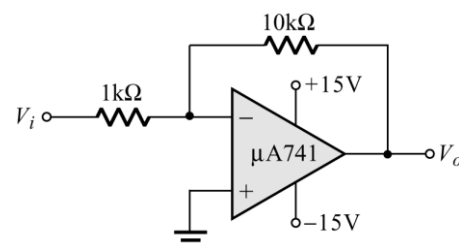
(3)若  $V_A = +2V$  , 則  $V_o = -\frac{4k}{2k} \times V_A = (-2) \times (+2) = -4(V)$

(4)若  $V_A = -2V$  , 則  $V_o = -\frac{4k}{2k} \times V_A = (-2) \times (-2) = 4(V)$

EX : 圖為實際運算放大器之接線 , 且電源供給電壓為 15 及 -15

伏

特 , 若輸入電壓為 2 伏特 , 則輸出電壓約為多少 ? ( 90 年 )



sol :  $V_o = A_v \times V_i = (-\frac{10k}{1k}) \times 2 = -20(V)$

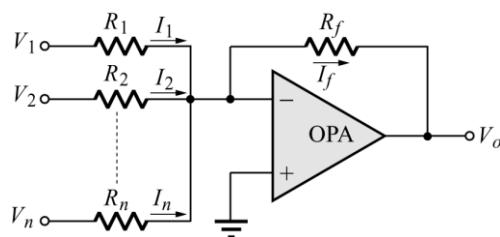
輸出電壓 (  $V_o$  ) 已大於 OPA 的電源電壓 ( $\pm 15V$ )

→ OPA 發生飽和現象

→  $V_o = V_{o(sat)} = V_{CC} = -15V$

## 二、反相加法器

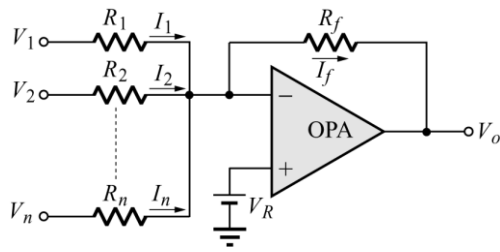
( 1 )



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

輸出電壓

( 2 ) ( 87 年 )



$$V_o = (V_1 - V_R)\left(-\frac{R_f}{R_1}\right) + (V_2 - V_R)\left(-\frac{R_f}{R_2}\right) + \cdots + (V_n - V_R)\left(-\frac{R_f}{R_n}\right)$$

輸出電壓

EX：圖所示為一運算放大電路，試求輸出電壓  $V_o$  為若干？

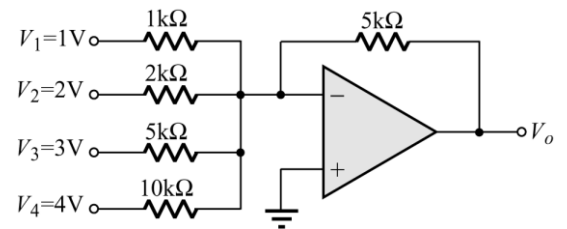
sol :

$$V_o = \left(-\frac{5k}{1k}\right)V_1 + \left(-\frac{5k}{2k}\right)V_2 + \left(-\frac{5k}{5k}\right)V_3 + \left(-\frac{5k}{10k}\right)V_4$$

$$= (-5) \times (1) + (-2.5) \times 2 + (-1) \times (3) + \left(-\frac{1}{2}\right) \times 4$$

$$= -5 - 5 - 3 - 2$$

$$= -15(V)$$

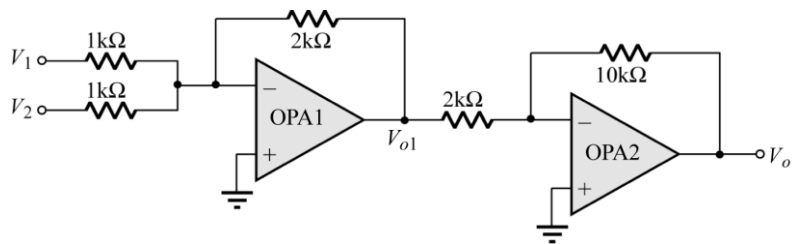


( 83 年 )

EX：如圖所示電路，OPA1 之輸入電壓

$V_1=0.2V$ ， $V_2=0.5V$ ，OPA2 之輸出

電壓  $V_o$  為何？ ( 90 年 )



sol : (1)  $V_{o1} = \left(-\frac{2k}{1k}\right) \times V_1 + \left(-\frac{2k}{1k}\right) \times V_2$

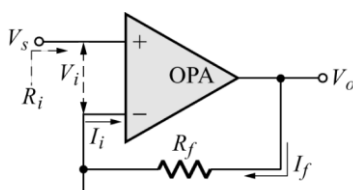
$$= (-2)(0.2) + (-2)(0.5)$$

$$= -1.4(V)$$

(2)  $V_o = \left(-\frac{10k}{2k}\right) \times V_{o1} = (-5) \times V_{o1} = (-5) \times (-1.4) = 7(V)$

## § 8-4 非反相 ( 非倒相 ) 放大器與電壓隨耦器

### 一、非反相放大器





$$(1) A_v = \frac{V_o}{V_s} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (V_o \text{ 與 } V_i \text{ 同相})$$

(2) 輸出電壓 ( $V_o$ ) 不受負載的影響，即  $V_o = V_s \times A_v$ 。

(3)  $R_i \cong \infty$  ( $R_i$  為電路的輸入阻抗)。

(4) 輸出飽和時的狀態

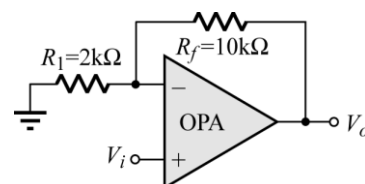
$$a、V_o = V_{o(sat)} = \pm V_{CC}$$

b、 $V \neq V_+$  虛接地觀念不適用

EX：如圖所示電路，假設理想 OPA，若  $R_f = 10k\Omega$ ， $R_1 = 2k\Omega$ ， $V_i = 2V$ ，

則輸出電壓  $V_o = ?$

(89 年)



sol：電路為非反相放大器

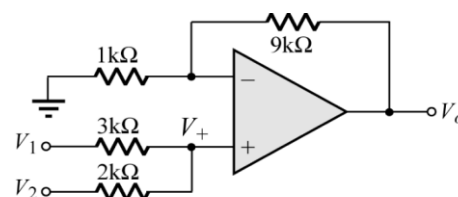
$$A_v = (1 + \frac{R_f}{R_1}) = (1 + \frac{10k}{2k}) = 6$$

$$V_o = V_i \times A_v = 2 \times 6 = 12(V)$$

EX：圖為理想之運算放大器電路，若  $V_1 = 20mV$ ， $V_2 = 10mV$

則  $V_o$  之大小為何？

(85 年)

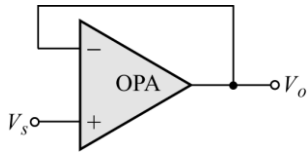


$$\begin{aligned} \text{sol: } V_+ &= V_1 \times \frac{2k}{3k + 2k} + V_2 \times \frac{3k}{3k + 2k} = 20 \times \frac{2}{5} + 10 \times \frac{3}{5} \\ &= 14(mV) \end{aligned}$$

該電路為非反相放大器，故

$$V_o = V_i \times A_v = V_+ \times A_v = 14 \times (1 + \frac{9k}{1k}) = 140(mV) = 0.14(V)$$

## 二、電壓隨耦器



(1)  $A_v = 1$ 。

(2) 輸入阻抗  $R_i \cong \infty$ ，輸出阻抗  $R_o \cong 0 \rightarrow$  阻抗匹配的緩衝器

(3) 輸出飽和時的狀態

a、 $V_o = V_{o(sat)} = \pm V_{CC}$

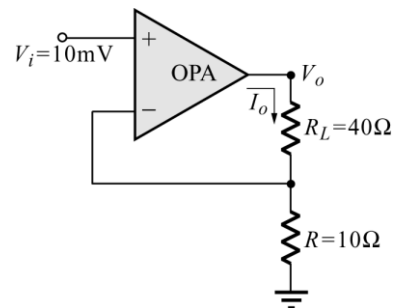
b、 $V \neq V_+$  虛接地觀念不適用。

EX：圖中之  $I_o$  為多少？（假設該 OPA 為理想運算放大器）（86 年）

sol：由虛接地觀念知

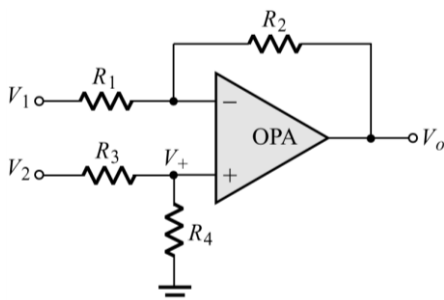
$$V_R = V_- = V_+ = V_i$$

$$\therefore I_R = I_o = \frac{V_R}{R} = \frac{V_i}{R} = \frac{10mV}{10\Omega} = 1mA$$



## § 8-5 減法器 ( 差放大器 )

### 一、基本型減法器



( 1 ) 令  $V_2 = 0$

$$V_{O1} = -\frac{R_2}{R_1} V_1$$

( 2 ) 令  $V_1 = 0$

$$V_{O2} = (1 + \frac{R_2}{R_1}) V_+ = (1 + \frac{R_2}{R_1}) (\frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2)$$

$$V_O = V_{O1} + V_{O2} = (-\frac{R_2}{R_1} V_1) + (1 + \frac{R_2}{R_1}) (\frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2)$$

當  $R_1 = R_3$  ,  $R_2 = R_4$  時

$$V_O = (V_2 - V_1) \frac{R_2}{R_1}$$

EX : 如圖所示電路 , 若 OPA 視為理想放大器 , 則輸出電壓  $V_{out}$

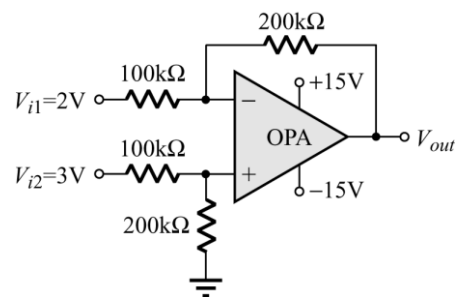
為多少 ?

( 89 年 )

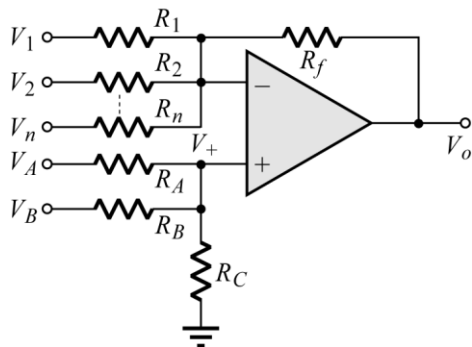
sol : 電路為減法放大器 ,

且  $R_1 = R_3 = 100k\Omega$  ,  $R_2 = R_4 = 200k\Omega$

$$V_{out} = (V_{i2} - V_{i1}) \times \frac{200k}{100k} = (3 - 2) \times 2 = 2(V)$$



二、複雜型減法器 ( 多端輸入 )

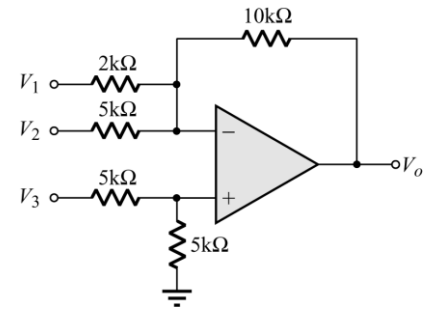


$$V_o = (V_1 - V_+) \left( -\frac{R_f}{R_1} \right) + (V_2 - V_+) \left( -\frac{R_f}{R_1} \right) + \cdots + (V_n - V_+) \left( -\frac{R_f}{R_n} \right) + V_+$$

EX：如圖，已知  $V_1=1V$ ， $V_2=1V$ ， $V_3=2V$ ，則  $V_o=?$  ( 89 年 )

$$\text{sol : (1)} V_+ = V_3 \times \frac{5k}{5k+5k} = 2 \times \frac{1}{2} = 1(V)$$

$$\begin{aligned} \text{(2)} V_o &= (V_1 - V_+) \times \left( -\frac{10k}{2k} \right) + (V_2 - V_+) \times \left( -\frac{10k}{5k} \right) + V_+ \\ &= (1-1) \times (-5) + (-1-1) \times (-2) + 1 \\ &= 5(V) \end{aligned}$$



EX：圖為理想運算放大器之電路，其電壓增益為？( 92 年 )

$$\text{sol : (1)} \text{ 設 } V_i=1V, \text{ 則 } I_1 = \frac{V_i - V_1}{R_1} = \frac{1-0}{1M} = 1(\mu A)$$

$$\text{(2)} \because I_i=0 \text{ (OPA 虛接地),}$$

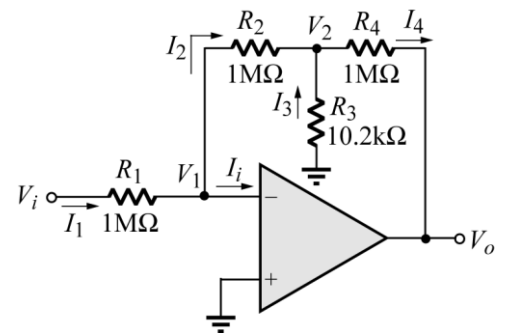
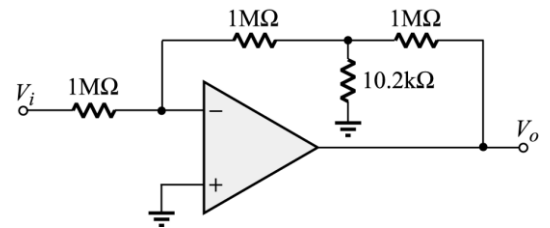
$$\therefore I_2 = I_1 - I_i = I_1 = 1\mu A$$

$$\text{故 } V_2 = -I_2 R_2 = -1 \times 1 = -1(V)$$

$$\text{(3)} I_3 = \frac{V_2}{R_3} = \frac{1}{10.2k} \cong \frac{1}{10k} = 0.1(mA) = 100(\mu A)$$

$$\begin{aligned} \text{(4)} V_o &= -I_4 R_4 + V_2 = -(I_2 + I_3) \times R_4 + V_2 \\ &= -(1+100) \times 1 + (-1) = -102(V) \end{aligned}$$

$$\text{所以 } A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong \frac{-102}{1} = 102$$



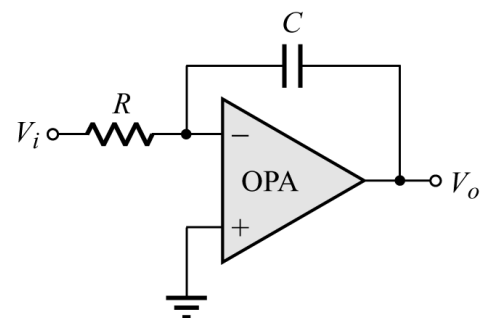
## 第九章 運算放大器 ( II )

### § 9-1 積分器 ( 米勒積分器 )

#### 一、積分電路 ( 米勒積分器 )

$$(1) V_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} V_i(t) dt + V_C(t)$$

其中  $V_C(t)$  為  $t = t_1$  時的電容電壓。



(2) 當輸入為  $\sin(t)$  與  $\cos(t)$  時

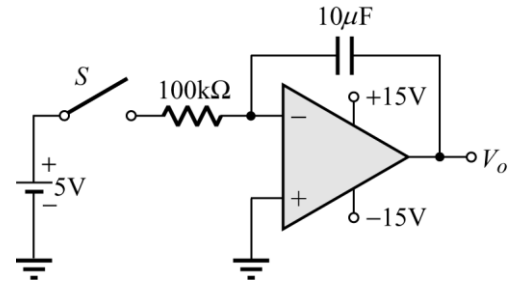
$$V_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} V_i(t) dt$$

(3) 輸入訊號的週期  $T \leq \frac{RC}{10}$  (89 年)  $\rightarrow$  輸入訊號的頻率  $f_i \geq \frac{10}{RC}$

EX: 如圖所示為米勒積分器, 設電容器初始電壓為 0V,  $t=0$  時  $S$

接通, 當  $t=1$  秒時,  $V_o$  電壓為多少? (83、87 年)

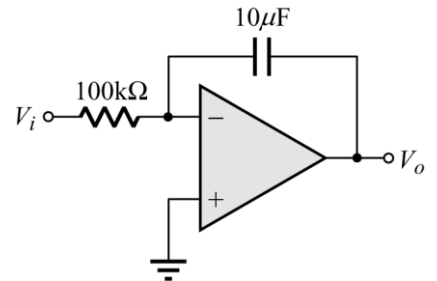
$$\begin{aligned} \text{sol: } V_o &= -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} V_i(t) dt + V_C(t_1) \\ &= -\frac{1}{100 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6}} \int_0^1 5 dt + 0 \\ &= -1 \times [5 - 0] \\ &= -5(\text{V}) \end{aligned}$$



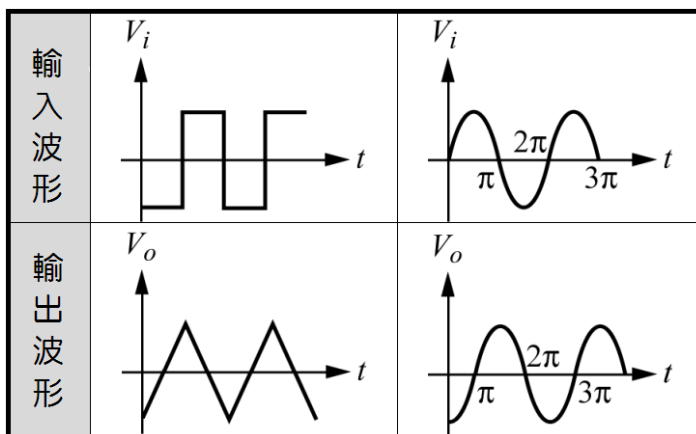
EX: 如圖所示理想運算放大器電路, 若  $V_i = 2\sin t$  伏特, 當電路達穩態

後, 則  $V_o$  應為? (88 年)

$$\begin{aligned} \text{sol: } V_o &= -\frac{1}{RC} \int V_i(t) dt = -\frac{1}{100\text{k} \cdot 10\mu} \int 2\sin t dt \\ &= -\frac{1}{100 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6}} \int 2\sin t dt \\ &= -1 \times 2(-\cos t) \\ &= 2\cos t (\text{V}) \end{aligned}$$



## 二、波形輸入積分器的變化

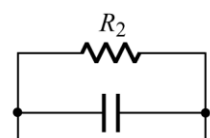


(1) 方波  $\xrightarrow{\text{積分}}$  三角波 (83、88、90 年)

(2) 正弦波  $\xrightarrow{\text{積分}}$  負餘弦波

## 三、積分器的低頻補償

(1) 當輸入信號的頻率  $\downarrow$



→ 電路的放大倍數 (  $A_v = -\frac{X_c}{R_1}$  ) ↑

→ 電路不穩定

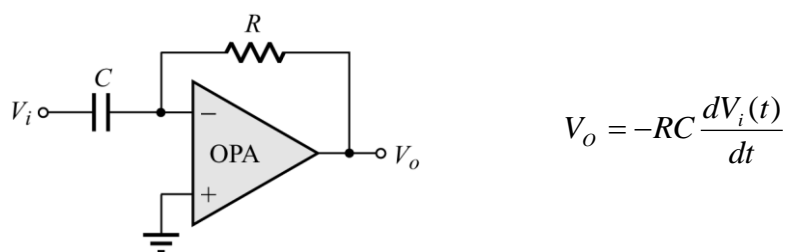
→ 在電容  $C$  上並聯一個高阻值電阻  $R_2$  (  $R_2 \cong 100 R_1$  )

→ 低頻補償

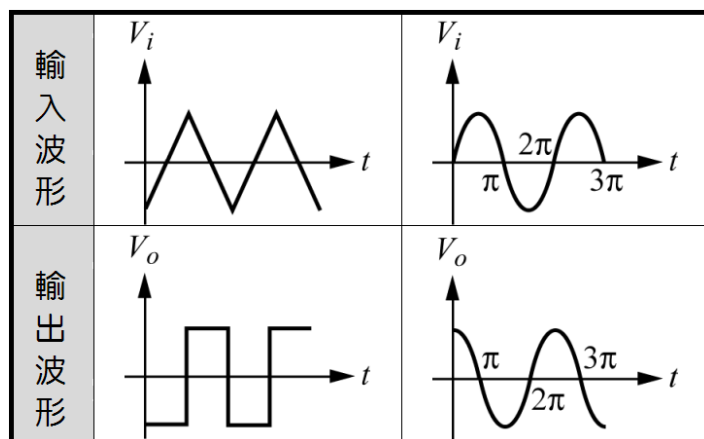
( 2 ) 條件：輸入信號的頻率  $f_i > \frac{1}{2\pi R_2 C}$  ( 86、87 年 )

## § 9-2 微分器

### 一、微分電路



### 二、波形輸入微分器的變化



( 1 ) 三角波  $\xrightarrow{\text{微分}}$  方波 ( 83、85、86、89 年 )

$\xleftarrow{\hspace{1cm}}$

積分

微分

( 2 ) 正弦波  $\xrightarrow{\hspace{1cm}}$  餘弦波 ( 89 年 )

$\xleftarrow{\hspace{1cm}}$

積分

EX：已知  $V_i = 10\sin 200\pi t$ ，及理想運算放大器（OPA），則圖微分

器之輸出電壓  $V_o$  為何？

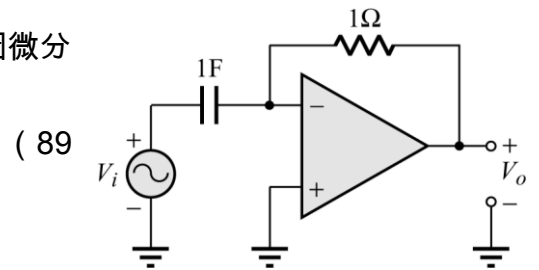
年）

sol：

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

$$= -RC \frac{d(10\sin 200\pi t)}{dt}$$

$$= -1 \times 1 \times 10 \times (200\pi) \times \cos 200\pi t = -2000\pi \cos 200\pi t$$



### 三、微分器的高頻補償

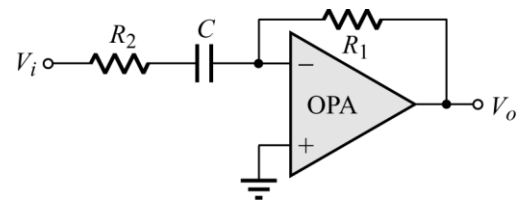
（1）當輸入信號的頻率↑

→ 電路的放大倍數  $(A_v = -\frac{X_c}{R_1}) \uparrow$

→ 電路不穩定

→ 在電容  $C$  串聯上一個低阻值電阻  $R_2$  ( $R_2 \approx \frac{1}{100} R_1$ )

→ 高頻補償



（2）條件：輸入信號的頻率  $f_i < \frac{1}{2\pi R_2 C}$ （86 年）

## § 9-3 比較器

一、OPA 的開環路增益近似無限大→經常被當作電壓比較器

(1)  $V_1 > V_2 > 0 \Rightarrow V_o \neq -V_{CC}$

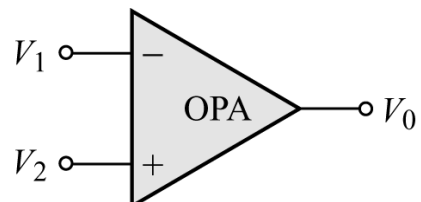
(2)  $V_2 > V_1 > 0 \Rightarrow V_o \neq +V_{CC}$

(3)  $V_1 < V_2 < 0 \Rightarrow V_o \neq +V_{CC}$

(4)  $V_2 < V_1 < 0 \Rightarrow V_o \neq -V_{CC}$

(5)  $V_1 > 0 > V_2 \Rightarrow V_o \neq -V_{CC}$

(6)  $V_2 > 0 > V_1 \Rightarrow V_o \neq +V_{CC}$



→輸出電壓呈現正飽和 ( $\approx +V_{CC}$ )、負飽和 ( $\approx -V_{CC}$ ) 狀態

→兩輸入電壓誰大，輸出就以誰為主

EX：如右圖，其輸入信號  $V_i$  為正弦波，則輸出端  $V_o$  的波形

為何？（89 年）

sol：由於  $R_2$  接地（0V），所以輸入信號（ $V_i$ ）與 0V 作比較

(1) 當  $V_i$  為正半週時， $V_o$  為 -V（ $\because V_o = A_v \times V_i$ ，而  $A_v = -\infty$ ）

(2) 當  $V_i$  為負半週時， $V_o$  為 +V（ $\because V_o = A_v \times V_i$ ，而  $A_v = -\infty$ ）

故輸出方波

EX：右圖電路中，輸出電壓  $V_o$  之工作週期（duty cycle）為

何？（92 年）

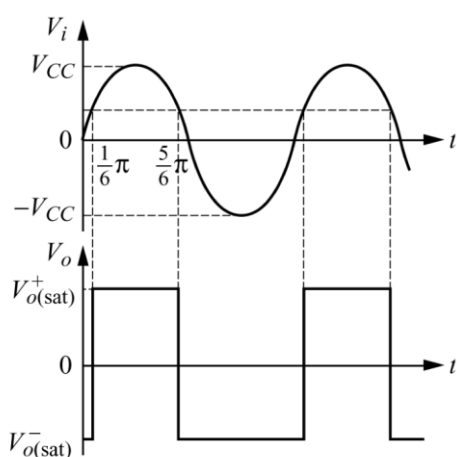
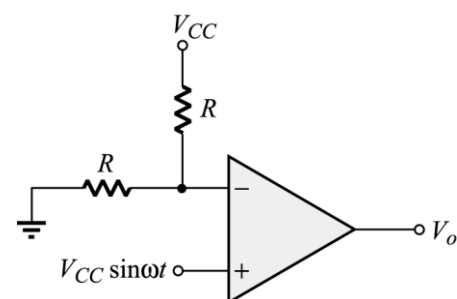
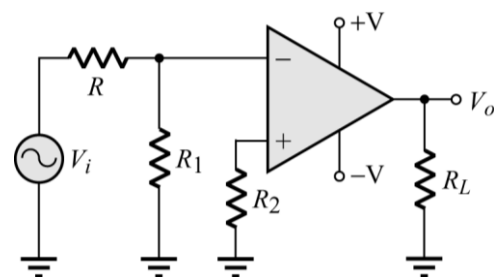
sol：(1)  $V = V_{CC} \times \frac{R}{R+R} = \frac{1}{2} V_{CC}$ ；由於電路為 OPA 比較器，所以

a. 當  $V_+ > V_- = \frac{1}{2} V_{CC}$  時， $V_o = V_{0(sat)}^+$

b. 當  $V_+ < V_- = \frac{1}{2} V_{CC}$  時， $V_o = V_{0(sat)}^-$

(2) 當  $\omega t$  為  $\frac{1}{6}\pi$  ( $=30^\circ$ ) 或  $\frac{5}{6}\pi$  ( $=150^\circ$ ) 時，都將使得輸入信號  $V_{CC} \sin \omega t = \frac{1}{2} V_{CC}$

$$\begin{aligned} \text{輸出電壓 } V_o \text{ 之工作週期} &= \frac{\frac{5}{6}\pi - \frac{1}{6}\pi}{2\pi} \times 100\% \\ &= \frac{1}{3} \times 100\% = 33.3\% \end{aligned}$$



## § 9-4 史密特觸發器

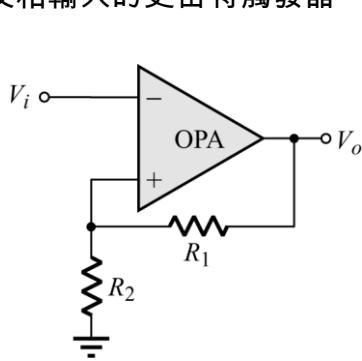


## 史密特觸發器 ( Schmitt trigger )：波形整形電路

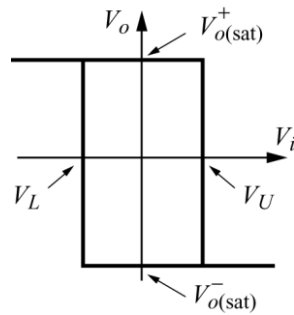
→任何輸入波形轉變成方波或脈波輸出

→適合數位邏輯電路使用。

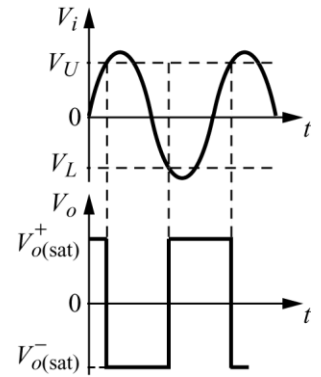
### 一、反相輸入的史密特觸發器



(a) 電路



(b) 輸入輸出特性曲線



(c) 輸入與輸出波形關係

( 1 ) 上臨界觸發電壓  $V_U$

$$V_U = V_o \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = V_{o(sat)}^+ \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cong +V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

( 2 ) 下臨界觸發電壓  $V_L$

$$V_L = V_o \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = V_{o(sat)}^- \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cong -V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

( 3 ) 磁滯電壓  $V_H$ ：不反應的電壓範圍

$$V_H = V_U - V_L = (V_{o(sat)}^+ - V_{o(sat)}^-) \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cong 2V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

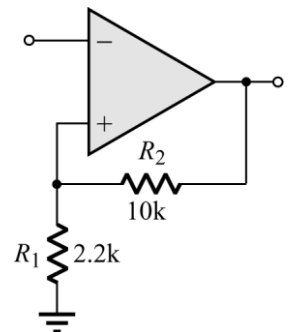
EX：如圖所示假設此電路電源為 $\pm 20V$ ，且輸出信號落於 $\pm 18V$ 之間，

請問此電路之遲滯電壓為多少？( 87 年 )

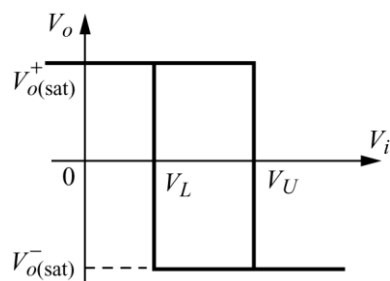
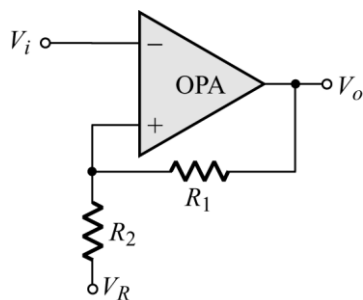
sol：(1) 上臨限觸發電壓  $V_U = V_{o(sat)}^- \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 18 \times \frac{2.2k}{10k + 2.2k} \doteq 3.25(V)$

(2) 下臨限觸發電壓  $V_L = V_{o(sat)}^+ \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} = (-18) \times \frac{2.2k}{10k + 2.2k} \doteq -3.25(V)$

(3) 磁滯電壓  $V_H = V_U - V_L = 3.25 - (-3.25) = 6.5(V)$



### 二、具參考電壓 ( $V_R$ ) 的史密特觸發器



(a) 電路

(b) 輸入輸出特性曲線

$$\text{上臨界觸發電壓 } V_U = V_{O(sat)}^+ \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_R \times \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\text{下臨界觸發電壓 } V_L = V_{O(sat)}^- \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_R \times \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\text{磁滯電壓 } V_H = V_U - V_L = (V_{O(sat)}^+ - V_{O(sat)}^-) \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{不變})$$

EX：如圖，左邊為電路圖，右邊為此電路之

輸入與輸出波形圖，則  $V_1$ ， $V_2$  之值分別

為何？

( 89

年 )

sol：(1) 上臨界觸發電壓

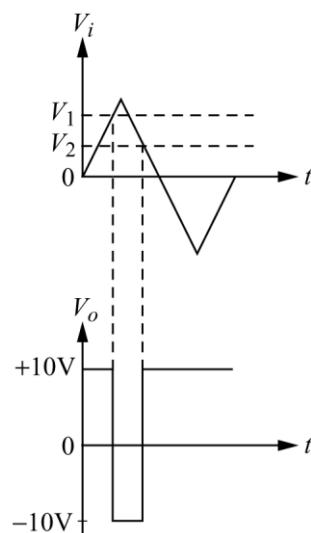
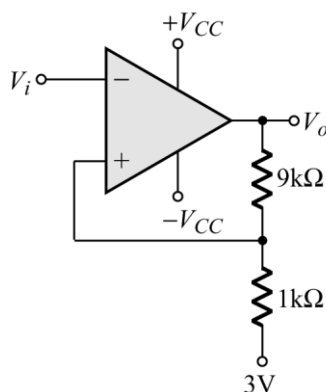
$$V_U = V_1 = V_{o(sat)}^+ \times \frac{1k}{9k + 1k} + 3 \times \frac{9k}{9k + 1k}$$

$$= 10 \times \frac{1}{10} + 3 \times \frac{9}{10} = 3.7(V)$$

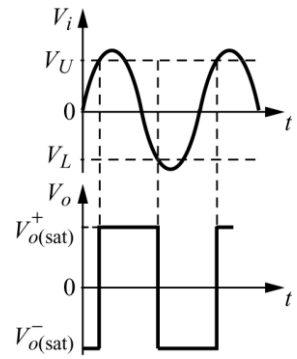
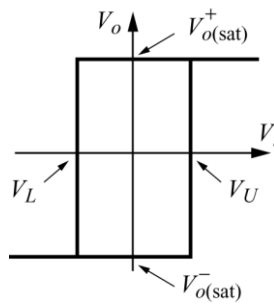
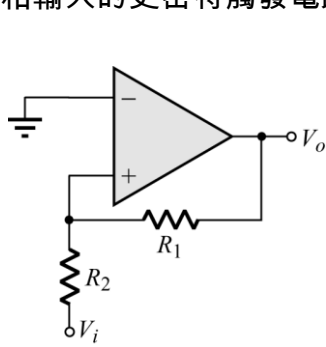
$$(2) \text{ 下臨界觸發電壓 } V_L = V_2 = V_{o(sat)}^- \times \frac{1k}{9k + 1k} + 3 \times \frac{9k}{9k + 1k}$$

$$= -10 \times \frac{1}{10} + 3 \times \frac{9}{10} = 1.7(V)$$

$$(3) \text{ 磁滯電壓 } V_H = V_U - V_L = V_1 - V_2 = 3.7 - 1.7 = 2(V)$$



### 三、非反相輸入的史密特觸發電路



(a) 電路

(b) 輸入輸出特性曲線

(c) 輸入與輸出波形關係

$$\text{上臨界觸發電壓 } V_U = V_{O(sat)}^+ \times \frac{R_2}{R_1}$$

$$\text{下臨界觸發電壓 } V_L = V_{O(sat)}^- \times \frac{R_2}{R_1}$$

$$\text{磁滯電壓 } V_H = V_U - V_L = (V_{O(sat)}^+ - V_{O(sat)}^-) \times \frac{R_2}{R_1}$$

EX : 如圖之史密特觸發器，OP 之正負飽和值分別為+15V 及-15V，

則此觸發器的正臨界電壓  $V_U$ 、負臨界電壓  $V_L$  分別為何？

sol : (1) 當  $V_i < V_U$  時， $V_o$  轉變為  $V_{o(sat)}^- = -15V$ ，

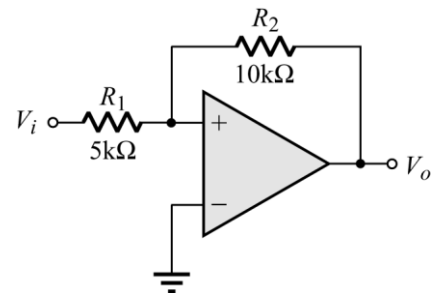
$$V_U = V_{O(sat)}^+ \times \frac{R_1}{R_2} = 15 \times \frac{5^K}{10^K} = 7.5$$

故  $V_U = V_i = 7.5V$

(2) 當  $V_i > V_L$  時， $V_o$  轉變為  $V_{o(sat)}^+ = +15V$ ，

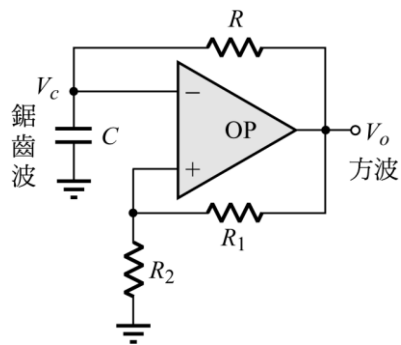
$$V_L = V_{O(sat)}^- \times \frac{R_2}{R_1} = -15 \times \frac{5^K}{10^K} = -7.5$$

故  $V_L = V_i = -7.5V$

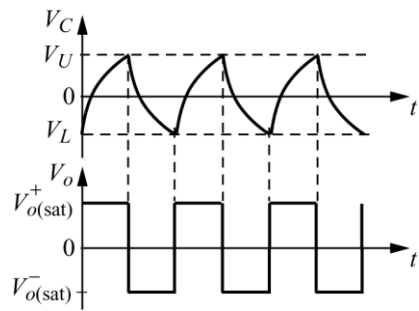


### 四、應用電路

## 1、方波產生器 ( 反相輸入 )

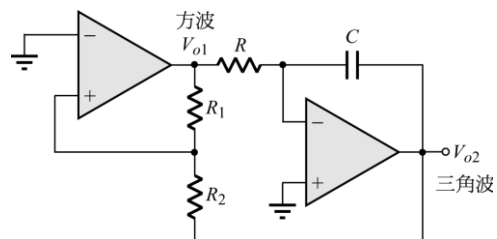


(a) 電路

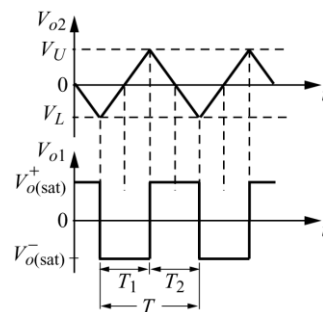


(b) 輸入輸出波形時序

## 2、三角波產生器 ( 非反相輸入 )



(a) 電路



(b) 輸入輸出波形時序

## § 9-5 主動濾波器

### 一、主動低通濾波器

利用電晶體、運算放大器等主動元件，配合被動元件 R、C、L 所組成的濾波器

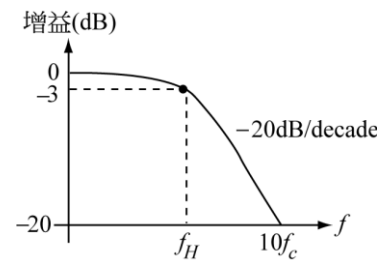
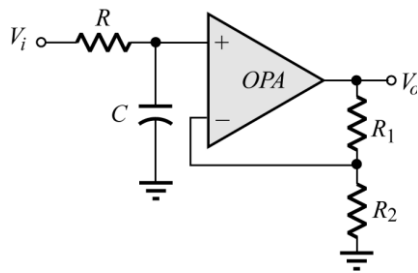
→ 具放大 ( 增益 ) 作用

### 1、一階主動低通濾波器 ( 一節 $RC$ 網路 )

$$\text{截止頻率 } f_H = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\text{頻率低於 } f_H \text{ 時} \rightarrow \text{電壓增益 } A_v = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

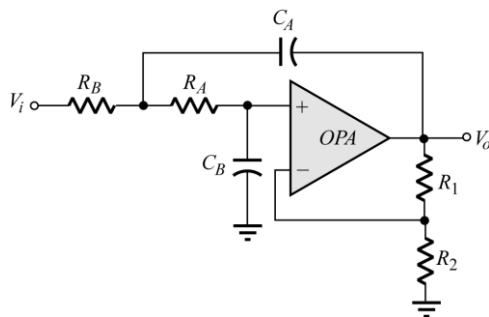
頻率高於  $f_H$  時 → 衰減斜率：每 10 倍頻率 20dB



(a) 電路

(b) 響應曲線

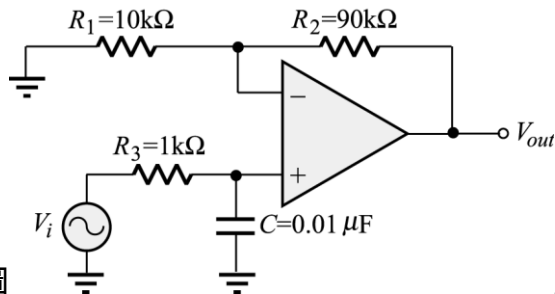
### 2、二階主動低通濾波器 ( 二節 $RC$ 網路 )



$$\text{截止頻率 } f_H = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_A R_B C_A C_B}}$$

$$\text{頻率低於 } f_H \text{ 時} \rightarrow \text{電壓增益 } A_v = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

頻率高於  $f_H$  時  $\rightarrow$  衰減斜率：每 10 倍頻率 40 dB



EX：如圖

所示電路（假設為理想 OP），當頻率為 159kHz

時，其電壓增益約為？（91 年）

◆詳解：(1)該電路為低通主動濾波器，所以其高頻截止頻率 ( $f_H$ ) 為

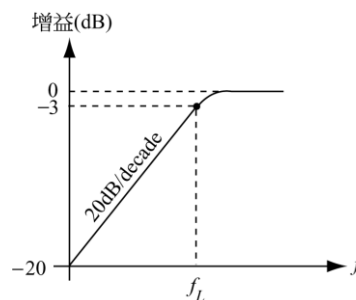
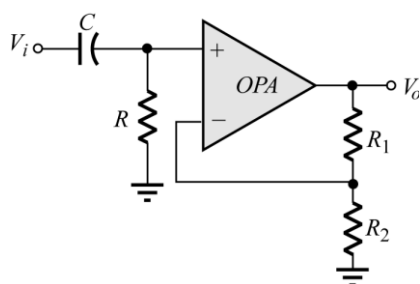
$$f_H = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 1 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6}} = 15.9 \text{ kHz}$$

(2)由於 OPA 為非反相放大器，所以其  $A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{90\text{k}}{10\text{k}} = 10$  (倍)，若以 dB 值表示，則為  $20 \log A_v = 20 \log 10 = 20 \text{ dB}$

(3)輸入頻率 159kHz 為截止頻率 15.9kHz 的 10 倍，由於輸入訊號的頻率每上升 10 倍時，該低通主動濾波器的增益將下降 20dB ( -20dB)，故當輸入訊號的頻率為 159kHz 時，其電壓增益已降為 0dB (20 - 20 = 0)

## 二、主動高通濾波器

### 1、一階主動高通濾波器（一節 RC 網路）



(a) 電路

(b) 響應曲線

$$\text{截止頻率 } f_L = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\text{頻率高於 } f_L \text{ 時} \rightarrow \text{電壓增益 } A_v = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

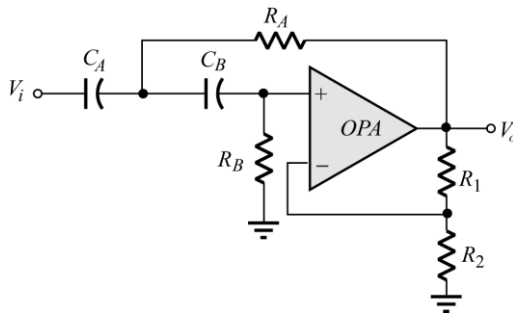
頻率低於  $f_L$  時  $\rightarrow$  增加斜率：每 10 倍頻率 20dB

## 2、二階主動高通濾波器 (二節 RC 網路)

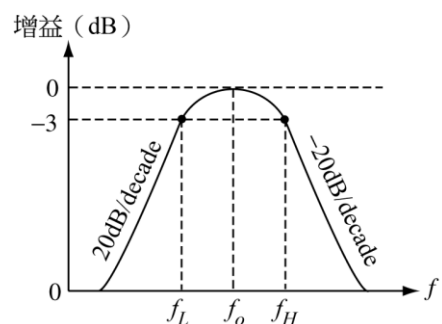
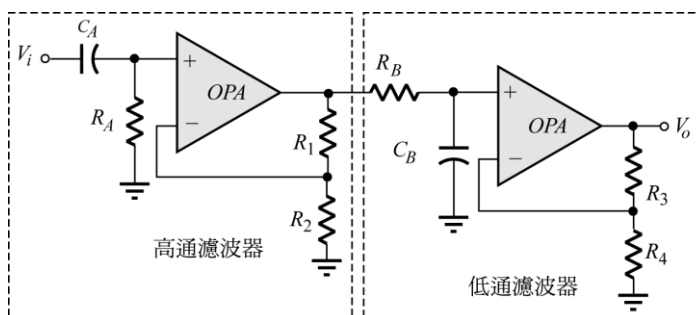
$$\text{截止頻率 } f_L = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_A R_B C_A C_B}}$$

$$\text{頻率高於 } f_L \text{ 時} \rightarrow \text{電壓增益 } A_v = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

頻率低於  $f_L$  時  $\rightarrow$  增加斜率：每 10 倍頻率 40 dB



## 三、主動帶通濾波器



(a) 電路 ( 高、低通濾波器的位置可互換 )

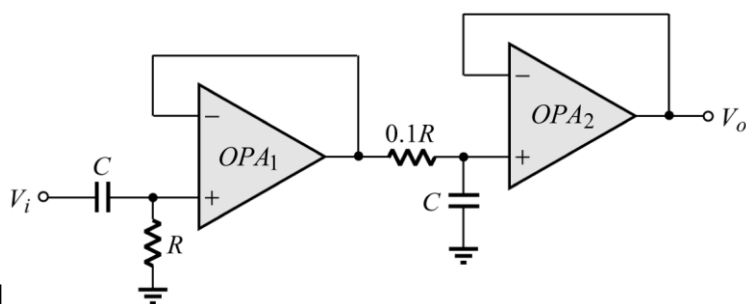
(b) 響應曲線

$$\text{低頻截止頻率 } f_L = \frac{1}{2\pi R_A C_A}$$

$$\text{高頻截止頻率 } f_H = \frac{1}{2\pi R_B C_B}$$

$$\text{頻帶寬度 } BW = f_H - f_L = \frac{1}{2\pi R_B C_B} - \frac{1}{2\pi R_A C_A}$$

$$\text{電壓增益 } A_v = A_{v1} \times A_{v2} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right)$$



EX : 圖

頻帶寬度為何？ ( 92 年 )

◆詳解：(1) OPA<sub>1</sub> 的電路為主動式高通濾波器，其低頻頻率截止點  $f_L = \frac{1}{2\pi RC}$

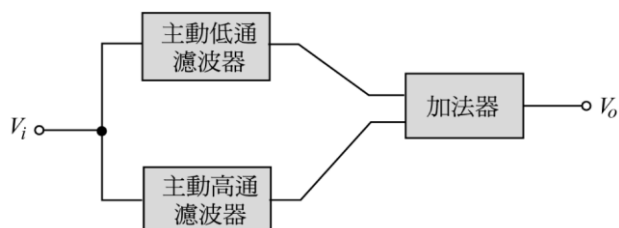
(2) OPA<sub>2</sub> 的電路為主動式低通濾波器，

$$\text{其高頻頻率截止點 } f_H = \frac{1}{2\pi \times 0.1R \times C} = \frac{10}{2\pi RC}$$

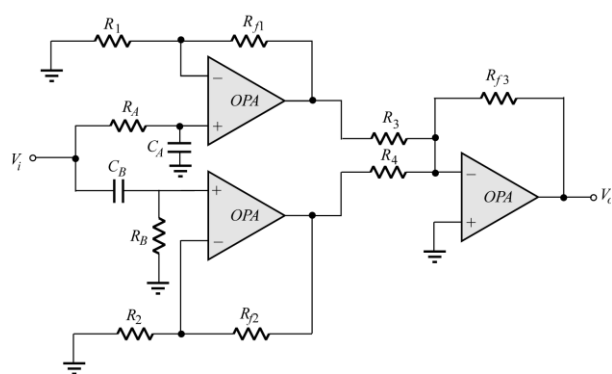
(3) 該電路為帶通濾波器，可通過訊號的頻帶寬度

$$BW = f_H - f_L = \frac{10}{2\pi RC} - \frac{1}{2\pi RC}$$

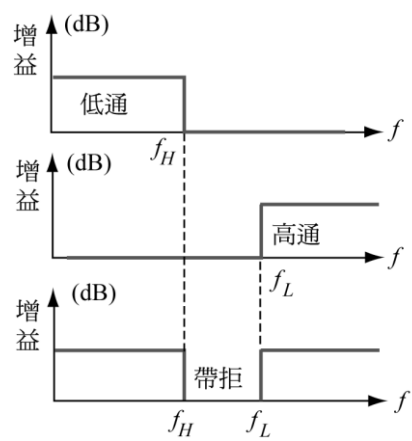
#### 四、主動帶拒濾波器







(b) 電路



(c) 理想的帶拒濾波器的頻率響應