

# 實驗十 運算放大器與 Zener 二極體 壓差調節電路

## 一、 實驗目的：

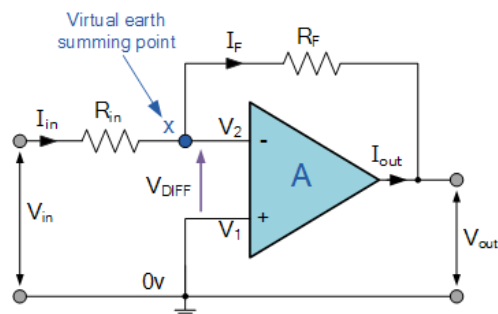
- (1) 了解運算放大器電路原理與量測分析。
- (2) 運算放大器作為微分與積分電路原理與量測分析。
- (3) 使用 Zener 二極體與運算放大器實現低壓差線性穩壓電路 (Linear Dropout Regulator, LDO) 與特性量測。

## 二、 原理說明：

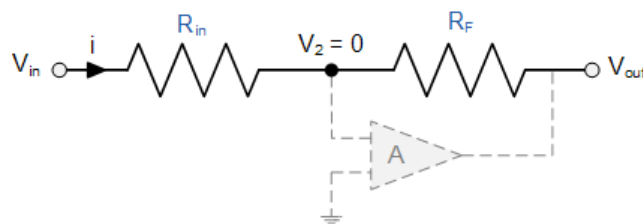
資料參考來源: [https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp\\_2.html](https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_2.html)

### (1) 基本運算放大器電路

#### A. 反向放大器：



在反相放大器電路中，運算放大器與反饋連接以產生閉迴路操作。反相放大器基本性質：“沒有電流流入輸入端子”和“ $V_1$  始終等於  $V_2$ ”。這是因為輸入和反饋信號(X)的結點與正輸入(+)的電位相同，正輸入為零伏或接地，因此該結點是“虛擬接地”。由於這個虛擬接地節點，放大器的輸入電阻等於輸入電阻  $R_{in}$ ，反相放大器的封閉迴路增益可以通過兩個外部電阻的比率來計算。



$$i = \frac{V_{in} - V_{out}}{R_{in} + R_f}$$

$$\text{therefore, } i = \frac{V_{in} - V_2}{R_{in}} = \frac{V_2 - V_{out}}{R_f}$$

$$i = \frac{V_{in}}{R_{in}} - \frac{V_2}{R_{in}} = \frac{V_2}{R_f} - \frac{V_{out}}{R_f}$$

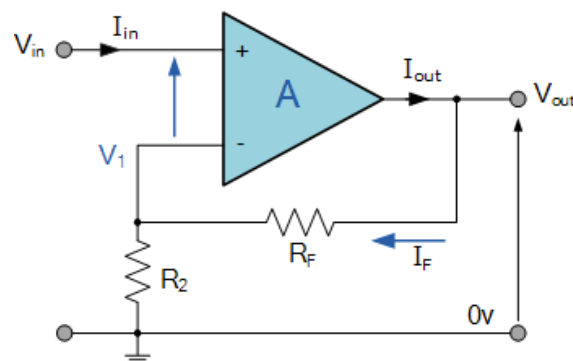
$$\text{so, } \frac{V_{in}}{R_{in}} = V_2 \left[ \frac{1}{R_{in}} + \frac{1}{R_f} \right] - \frac{V_{out}}{R_f}$$

$$\text{and as, } i = \frac{V_{in} - 0}{R_{in}} = \frac{0 - V_{out}}{R_f} \quad \frac{R_f}{R_{in}} = \frac{0 - V_{out}}{V_{in} - 0}$$

$$\text{the Closed Loop Gain (A}_v\text{) is given as, } \frac{V_{out}}{V_{in}} = - \frac{R_f}{R_{in}}$$

## B. 同向放大器

在同相運算放大器配置中，輸入電壓信號  $V_{in}$  直接施加於同相 (+) 輸入端子，這意味著放大器的輸出增益變為“正”值，其結果是輸出信號與輸入信號“同相”。同相運算放大器的反饋控制是通過  $R_F$  與  $R_2$  分壓器網路將一小部分輸出電壓信號施加回反相 (-) 輸入端，再次產生負反饋來實現的。這種配置產生的同相放大器電路具有非常好的穩定性、非常高的輸入阻抗，因為沒有電流流入正輸入端（理想條件）和低輸出阻抗  $R_{out}$ 。



同相運算放大器增益計算如下

$$V_1 = \frac{R_2}{R_2 + R_F} \times V_{OUT}$$

Ideal Summing Point:  $V_1 = V_{IN}$

Voltage Gain,  $A_{(V)}$  is equal to:  $\frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$

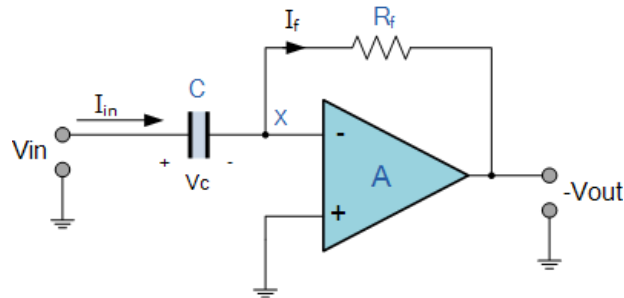
$$\text{Then, } A_{(V)} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{R_2 + R_F}{R_2}$$

$$\text{Transpose to give: } A_{(V)} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 1 + \frac{R_F}{R_2}$$

從上面的等式中可以看出，同相放大器的整體閉迴路放大增益總是大於但絕不小於 1，它本質上是正的，如果反饋電阻  $R_F$  的值為零，則放大器的增益將正好等於 1。

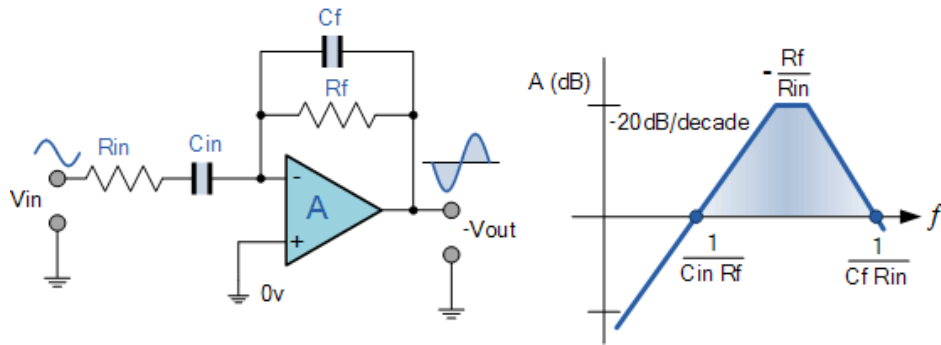
## (2) 運算放大器微分與積分電路

### A, 微分電路

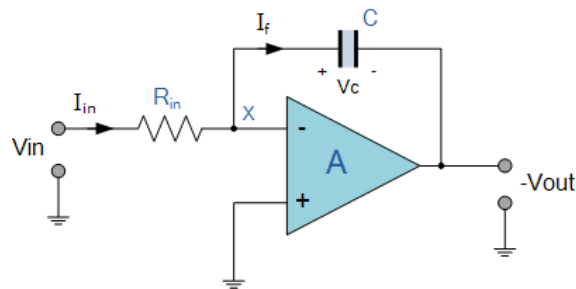


微分器的輸入信號施加到電容器，電容器阻斷任何直流內容，因此沒有電流流向放大器求和點 X，導致輸出電壓為零。電容器只允許交流型輸入電壓變化通過，其頻率取決於輸入信號的變化率。在低頻時，電容的電抗為「高」，導致運算放大器的增益和輸出電壓低。在較高頻率下，電容的電抗要低得多，從而產生更高的增益和來自微分放大器的輸出電壓。

然而，在高頻下，運算放大器微分器電路變得不穩定，並開震盪。這主要是由於一階效應，它決定了運算放大器電路的頻率響應，在高頻下，輸出電壓遠高於預期。為了避免這種情況，需要通過在反饋電阻  $R_f$  上增加一個額外的小值電容  $C_f$  來降低電路的高頻增益。



## B. 積分電路



以下獲得此電路之積分特性：電容器極板上的電壓等於電容器上的電荷除以電容，得到  $Q/C$ 。然後電容器兩端的電壓輸出  $V_{out}$ ，因此： $-V_{out} = Q/C$ 。如果電容器正在充電和放電，則電容器兩端的電壓充電速率為：

$$V_c = \frac{Q}{C}, \quad V_c = V_x - V_{out} = 0 - V_{out}$$

$$\therefore -\frac{dV_{out}}{dt} = \frac{dQ}{Cdt} = \frac{1}{C} \frac{dQ}{dt}$$

但  $dQ/dt$  是電流，由於積分運算放大器在其反相輸入端的節點電壓為零， $X=0$ ，因此流過輸入電阻  $R_{in}$  的輸入電流  $I_{in}$ ：

$$I_{in} = \frac{V_{in} - 0}{R_{in}} = \frac{V_{in}}{R_{in}}$$

流過反饋電容  $C$  的電流如下：

$$I_f = C \frac{dV_{out}}{dt} = C \frac{dQ}{Cdt} = \frac{dQ}{dt} = \frac{dV_{out} \cdot C}{dt}$$

因為沒有電流流入運算放大器端子。因此，反相輸入端的節點方程為：

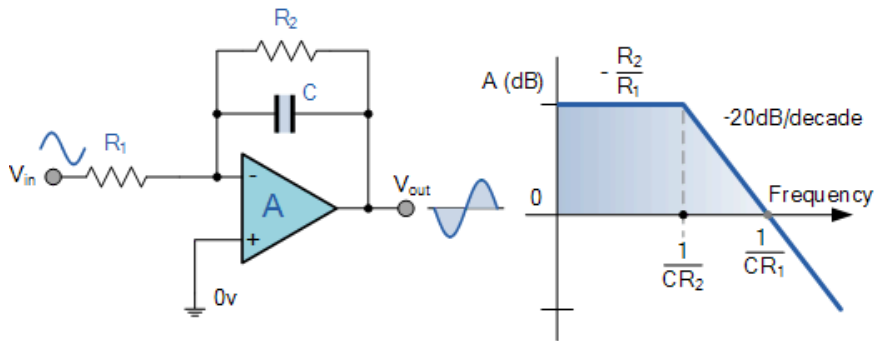
$$I_{in} = I_f = \frac{V_{in}}{R_{in}} = \frac{dV_{out} \cdot C}{dt}$$

$$\therefore \frac{V_{in}}{V_{out}} \times \frac{dt}{R_{in} C} = 1$$

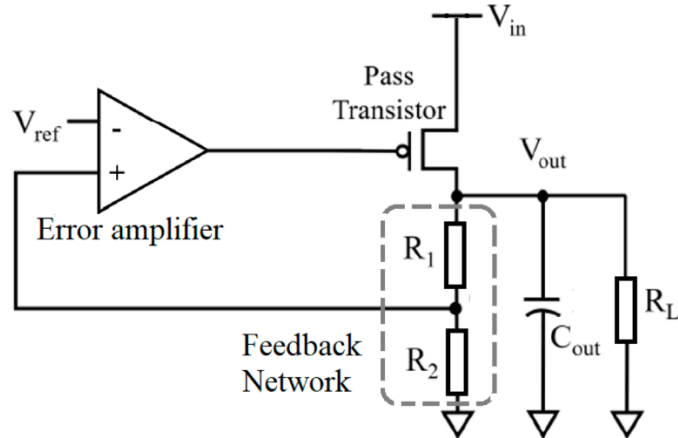
從中我們可推出運算放大器積分器的理想電壓輸出為：

$$V_{out} = -\frac{1}{R_{in}C} \int_0^t V_{in} dt = -\int_0^t V_{in} \frac{dt}{R_{in} \cdot C}$$

在零頻率或直流電下，電容器由於其電抗像開路(高阻抗)，運算放大器形成一個高增益的閉迴路。這會導致運算放大器變得不穩定，從而導致電壓飽和。將一個比  $R_1$  電阻值更大的電阻  $R_2$  與電容  $C$  並聯， $C$  為電路提供了反相放大器的積分 (低通) 特性，而具有閉迴路電壓增益可限制為  $R_2/R_1$ 。



### (3) LDO 電路



線性穩壓器是任何需要穩定電源管理系統中的關鍵元件，用於提供穩定的電源電壓，不受負載阻抗、輸入電壓變化、溫度和時間的影響。上圖所示為一個典型的 LDO 穩壓器的電路結構。它的組成包含了由基準電壓源  $V_{ref}$ 、誤差放大器 (EA)、以及一個調控電晶體作為輸入電壓  $V_{in}$  和穩定輸出電壓  $V_{out}$  之間的壓差調控元件，並且利用電阻反饋網路  $R_1$  與  $R_2$  回授調控電晶體的導通。

輸入電壓  $V_{in}$  或負載  $R_L$  的電流間任何變化都會由  $R_1$  與  $R_2$  的反饋網路所感知，誤差放大器將回授電壓與基準電壓源  $V_{ref}$  進行比較，生成一個控制信號，該信號持續驅動傳輸電晶體，以提供恆定的輸出電壓。LDO 所生成的一個持續輸出電壓為

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_{ref}$$

而壓差則為  $V_{dropout} = V_{in} - V_{out}$ ,  $V_{dropout} > 0$ 。輸出電容  $C_{out}$ ，為保證輸出電壓穩定，又需要最大限度地減少瞬態回應中的輸出電壓變化。此外，LDO 系統能在低靜態操作電流情況下運作也是必要。然而，低靜態電流不可避免地會減慢 LDO 瞬態回應，而 LDO 瞬時態回應主要由電晶體的啟動特性決定。由於功率耗散是壓差電壓和負載電流的乘積，因此壓差越高，表明更多的功率將作為熱量耗散。當電晶體的壓差較低時，就功耗而言，LDO 可被認為是一種高效的穩壓器。

### 三、 實驗器材：

電容	0.1 $\mu$ F, 47 $\mu$ F, 100 $\mu$ F	x1
電晶體	CS9012, CS9013	x1
二極體	1N4001	x4
Zener 二極體	1N4728A (3.3V)	x1
LED		x1
運算放大器	LM358P	x1
可變電阻	1 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$	x1
電阻	100 $\Omega$ , 330 $\Omega$ , 500 $\Omega$ , 1k $\Omega$ , 10k $\Omega$ , 100k $\Omega$ , 150k $\Omega$	x1

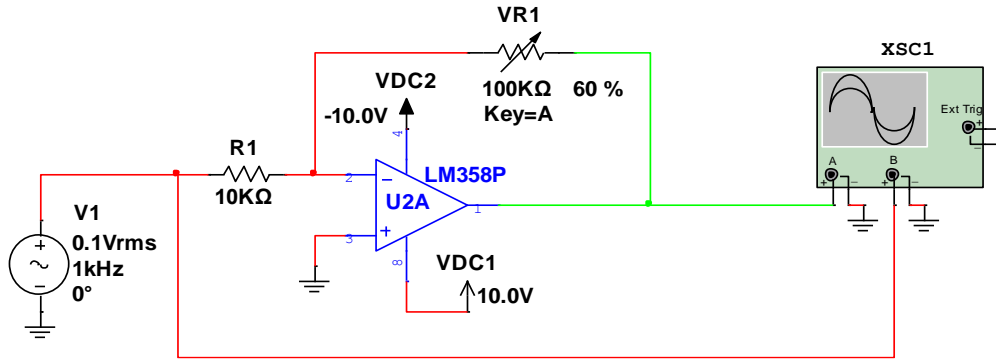
### 四、 實驗步驟：

#### 1. 工作一：基本運算放大器電路

注意：電源供應器產生正負電壓源的連線與設定方式，下圖為固維電源供應器參考連接。



(1) 按工作一圖(a) 連接電路，調信號產生器為 1kHz 的正弦波，震幅  $V_{pk}$  為 0.1 V，作為測試輸入信號。



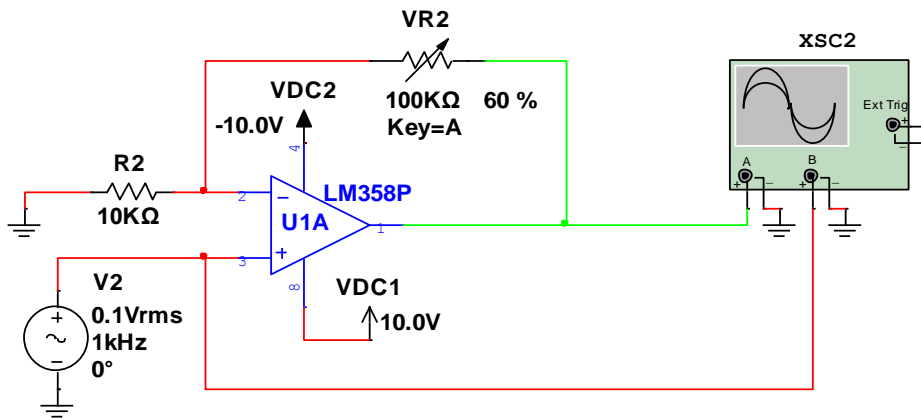
工作一圖(a)

(2) VR1 從小到大調至最大約 100K 歐姆，觀察波形並紀錄(如表 1)兩端電壓放大增益。

VR1 (KΩ)	0	30	50	70	100
Av					

表 1

(3)按工作一圖(b) 連接電路，調信號產生器為 1kHz 的正弦波，震幅 Vpk 為 0.1 V，作為測試輸入信號。



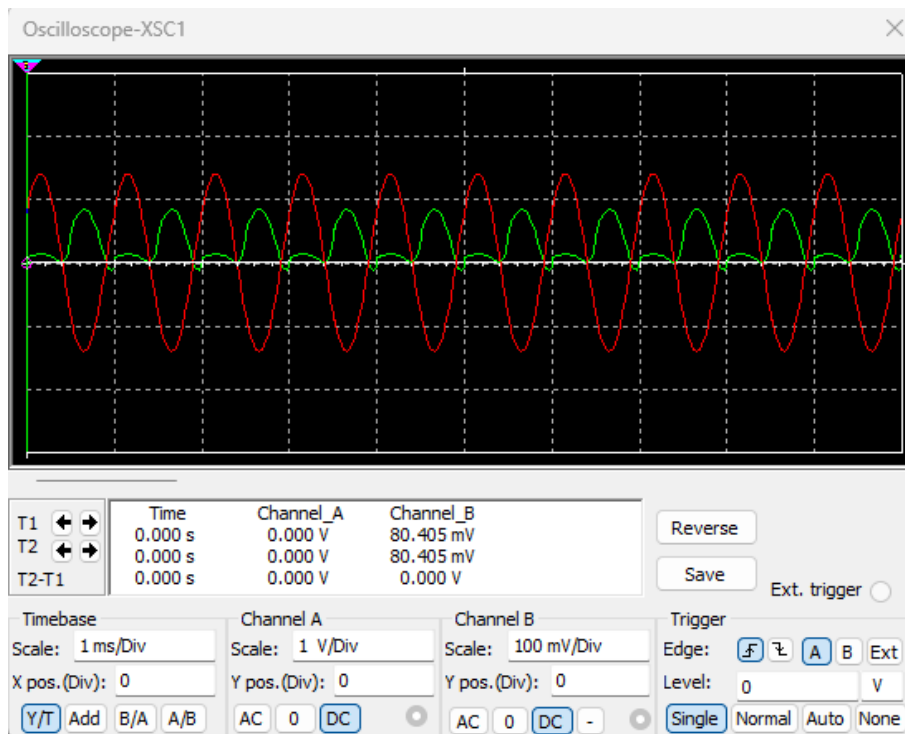
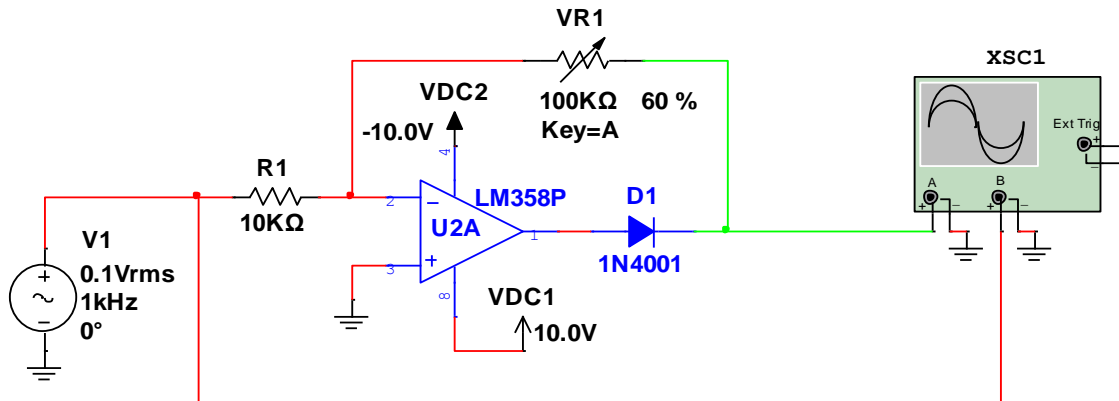
工作一圖(b)

(4) VR2 從小到大調至最大約 100K 歐姆，觀察波形並紀錄(如表 2)兩端電壓放大增益。

VR2 (KΩ)	0	30	50	70	100
Av					

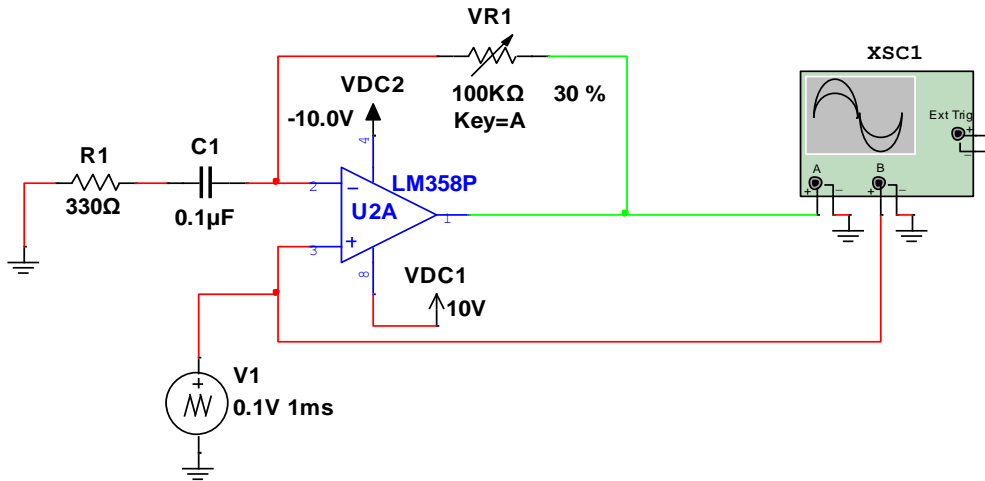
表 2

- (5) 觀察圖 (a) 與圖 (b) 電路結構有何不同， $A_v$  有何差異？各繪出（或拍照黏貼）將電阻調至最大值的 60% 時的波形於報告中。以上兩電路各增加放置一個 1N4001 二極體於 OP 輸出前如下圖，觀察並繪出波形。



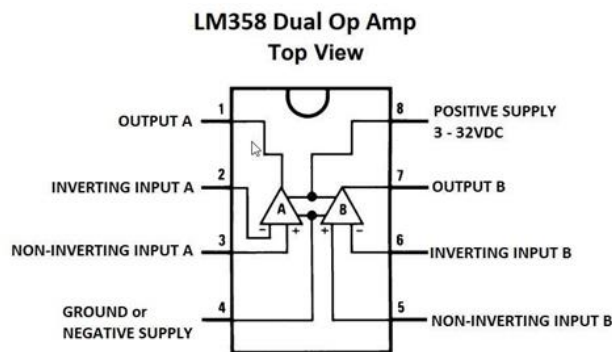
## 2. 工作二： 運算放大器微分與積分電路



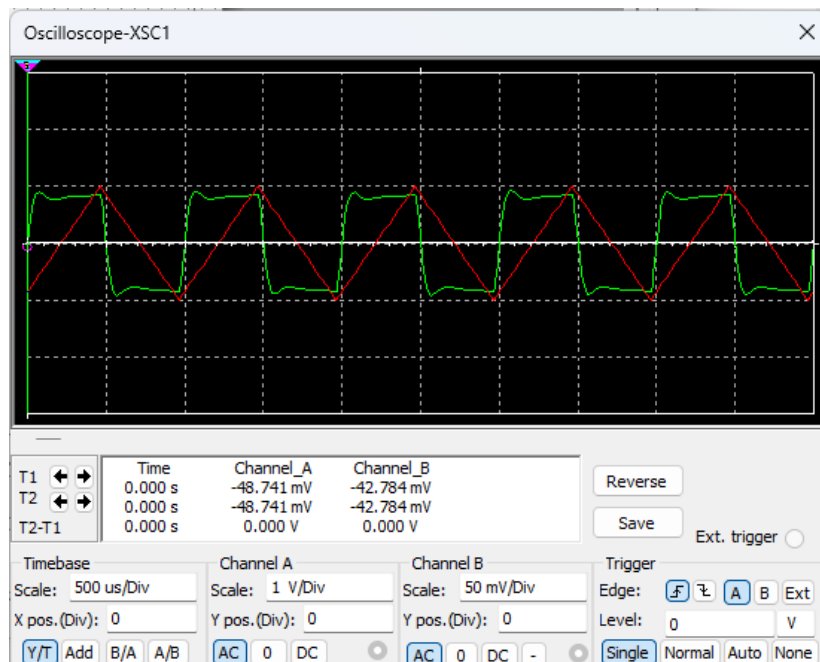


工作二圖(a)

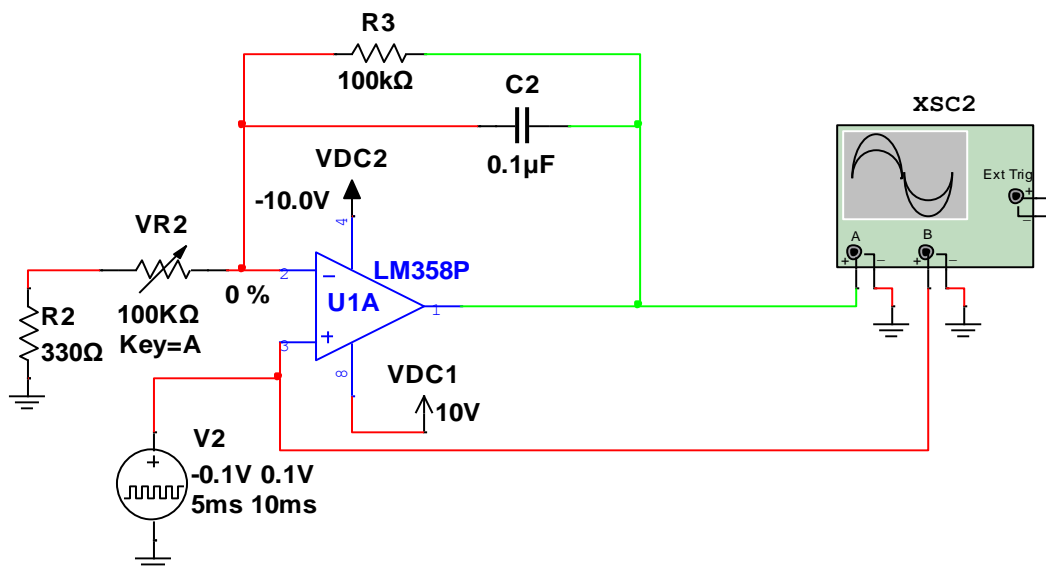
(1) 按工作二電路圖(a)連接線路，調整信號產生器輸出峰值為 0.1V 以及 1kHz 的三角波。注意運算放大器 LM358P 的接腳圖如下所示，其中 8 號腳接高電位 10V，而 4 號腳接對應地端的負電位 -10V。



(2) 改變 VR1 的電阻值，觀察大約調整至多少歐姆可以得到最佳近似的方波輸出？

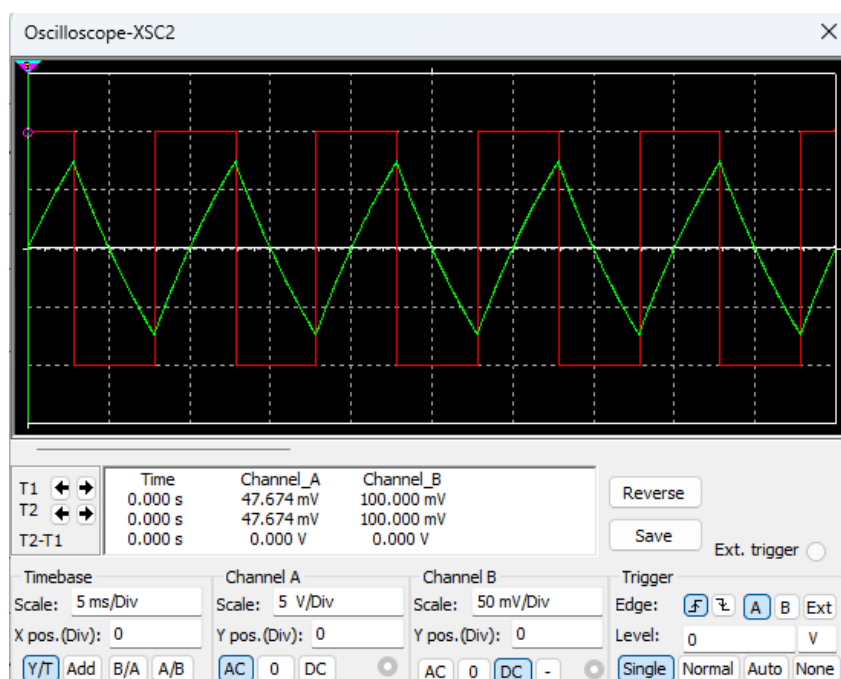


- (3) 觀察 VR1 值調大與調小所出現波形的變化，將其結果比較畫在報告裡。
- (4) 按工作二電路圖(b)連接線路，調整信號產生器輸出峰值為 0.1V 以及 100 Hz 的方波。



工作二圖(b)

- (5) 改變 VR2 的電阻值，觀察大約調整至多少歐姆可以得到最佳的三角波形輸出？

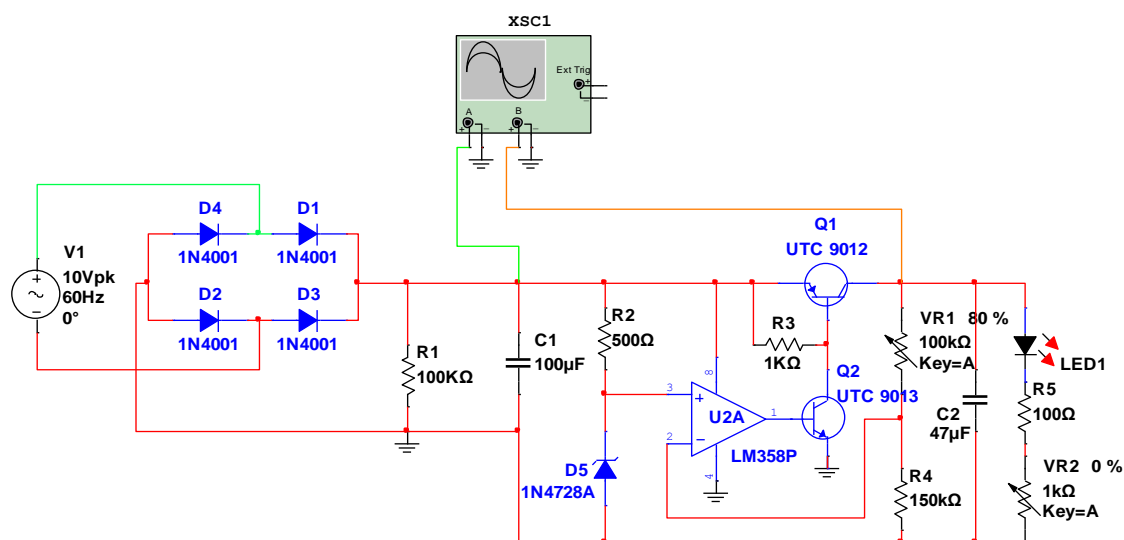


- (6) 觀察 VR2 值調大與調小所出現波形的變化，將其結果比較畫在報告裡。

### 3. 工作三：LDO 電路

注意: 接線測試過程中若 LED 燈號過暗, 可能已導致 Q1 電晶體輸出電壓過小, 可將 LM358P 之 Vcc 端 supply 電壓先解除, 後重新接上可恢復正常 (重新驅動 Q2 電晶體)。

- (1) 參考下圖, 完成工作三線路, 注意 Zener 二極體 D5 為反接, 即 Zener 二極體負端接 + 而正端接地。調整信號產生器輸出峰值為 10V 以及頻率為 60 Hz 的正弦波。



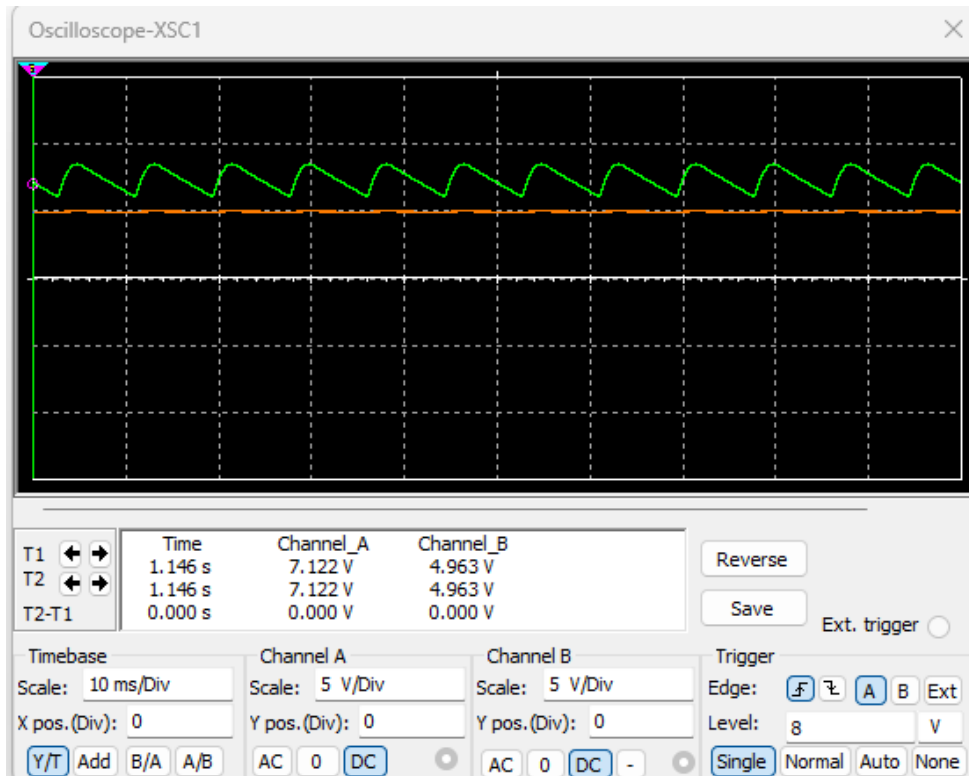
工作三圖

- (2) 量測 D5 電壓值為多少? LM358P 之負端 (-) 輸入腳位電壓為多少, 以及控制 Q2 電晶體之輸出電壓為多少? 紀錄於下表 3。

量測項目	D5 電壓	OP 負端輸入	OP 輸出
Volt			

表 3

- (3) 將 VR1 調整為最低電阻 (0 歐姆), VR2 為最大電阻 (1 k 歐姆), 觀察示波器在 Q1 電晶體輸入與輸出兩端的電壓差異, 並繪圖記錄。



(4) 將 VR2 值固定為最小，改變 VR1 值由小調至最大，觀察並記錄 Q1 電晶體 collector 端電壓  $Q1c$  以及 emitter 對 collector 端的電壓  $Vec$  於表 4 中。

VR1 (K $\Omega$ )	0	30	50	70	100
Q1c 電壓					
Q1 Vec					

表 4

(5) 將 VR1 固定為最大值，調整 VR2 值由小調至最大，觀察並記錄 Q1 電晶體輸出電壓  $Q1c$  變化於表 5 中。

VR2 ( $\Omega$ )	0	300	500	700	1000
Q1c 電壓					

表 5

## 五、問題討論：

1. 分析工作一項目 (2) 的理論放大增益結果，與量測結果做比較。
2. 分析工作一項目 (4) 的理論放大增益結果，與量測結果做比較。
3. 討論工作一項目 (5) 中，加入一個二極體後，輸出波形為何會有近乎半波整流的效果？如果改變二極體方向，預測輸出波形會是如何？
4. 分析工作二圖 (a) 的理論放大增益，並解釋工作二項目 (3) 改變 VR1 大小的波形變化。
5. 分析工作二圖 (b) 的理論放大增益，並解釋工作二項目 (6) 改變 VR2 大小的波形變化。
6. 討論在工作三中，LM358P 與電晶體 Q2 的作用。
7. 在工作三項目(4) 中是否觀察到 VR1 電阻值的改變與 Q1 電晶體輸出電壓改變具有線性關係？討論電晶體 Q1 在此電路的作用為何？
8. 討論工作三項目(5)，VR2 電阻的改變對於 Q1c 的輸出電壓變動影響如何？如果幾乎沒有變動，原理為何？