

實驗單元(八)：基本運算放大器電路(一)

一、實驗目的

- 1.了解運算放大器的基本特性、電路原理與應用。
- 2.了解運算放大器 Data Sheet 的內容與應用。
- 3.了解運算放大器電壓放大、直流偏移量及加法器等電路的應用。

二、實驗儀器設備與實驗材料表

表(一)：實驗儀器設備

儀器名稱	數量
萬用電錶或三用電錶	1 部
示波器	1 台
雙電源供應器	1 台
訊號產生器	1 台

表(二)：基本運算放大器電路實驗料表

項次	品 名	元 件 說 明	用量
1	R1、R15	1K Ω 5% 碳膜電阻	2 個
2	R27	6.8K Ω 5% 碳膜電阻	1 個
3	R2、R10、R11、R12、R13、 R16、R23、R25、R26、 R29、R1X、R16X	10K Ω 5% 碳膜電阻	12 個
4	R2X、R17X	100K Ω 5% 碳膜電阻	2 個
5	R3、R5、R9、R14、R17、 R19、R22、R28	可變電阻 VR 10K Ω	8 個
6	RX1	可變電阻 VR 5K Ω	1 個
7	RX2	可變電阻 VR 1M Ω	1 個
8	碳膜電阻	依設計值，選用適當電阻值及數量	X 個

項次	品 名	元 件 說 明	用 量
9	PE 電容	0.1uF (電源去耦合電容)	8 個
10	U1~U8	OP AMP uA741(分發 5 個)	5 個
11	電解質電容	100uF 或 120uF (電源去耦合電容)	2 個

◎說明：上述為每組材料。

三、實驗預習：試回答下列問題，附在實驗結報中。

1.請依據實驗設計要求，完成反相放大器電路及非反相放大器電路的電壓增益設計與計算，並選用適當的電阻值。

★增益值，請參閱表格(三)內容，輸入頻率值，請參閱表格(四)內容。

2.請依據實驗設計要求，完成反相加法器及非反相加法器設計，繳交上課筆記。

★電路圖及輸入設定，請參閱實作說明及電路圖。

四、零組件介紹

■運算放大器：

OP Amp (Operational Amplifier：運算放大器) 為最廣泛使用的類比積體電路，可以得到很高的差動增益放大器，它除了可以做為信號的放大以外，也可以應用在加減法器、微分器及積分器等線性電路與非線性電路，例如比較器 (comparator)、抽樣與保持 (Sample & Hold) 電路等，另外也可以應用在濾波器、振盪器及電源等類比電路上，其應用範圍極為廣泛，關於運算放大器基本的應用電路，在電子學課本內有詳細說明。

OP Amp 是由電晶體或 FET，二極體等主動元件，以及電阻，電容等所構成的放大器 IC。uA741 的內部電路圖如圖(一)所示。

關於 OP Amp 使用於電子電路上的優點可以整理如下：

①.零件點數可減少

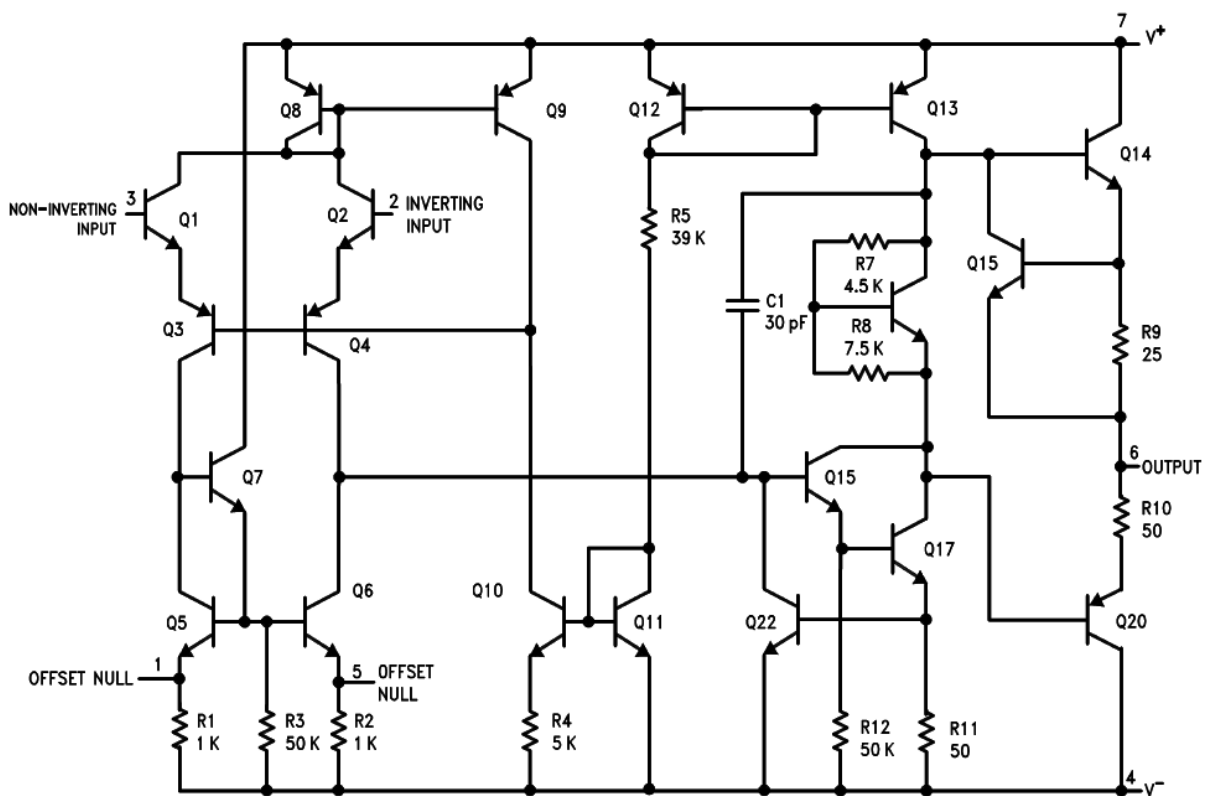
由於零件點數減少，故障率可以下降，使裝置更為小型及輕型化。

②.IC 化

可以提高性能，降低價格，如果以個別零件 (Discrete) 來設計出與 OP Amp 具有同樣性能的放大器，則價格為數倍以上。

③.可以節省設計時間

由於不必再設計放大器本身，因此整個電路的設計時間可以縮短。

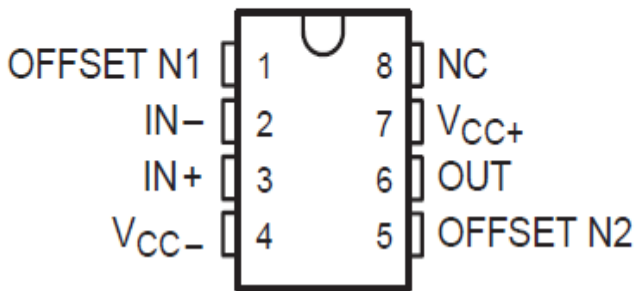


圖(一)：uA741 的內部電路圖[1]

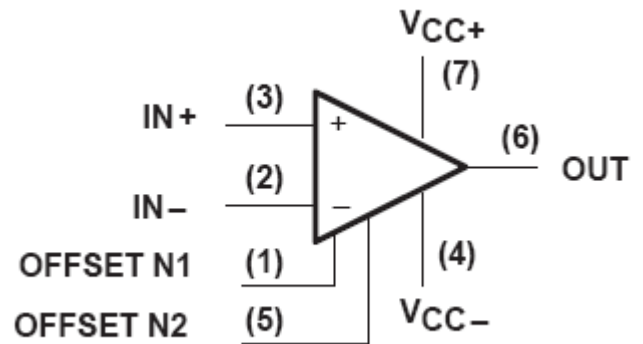
■uA741 接腳圖及包裝

a.uA741 包裝

μ A741M ... JG PACKAGE
 μ A741C, μ A741I ... D, P, OR PW PACKAGE
 (TOP VIEW)



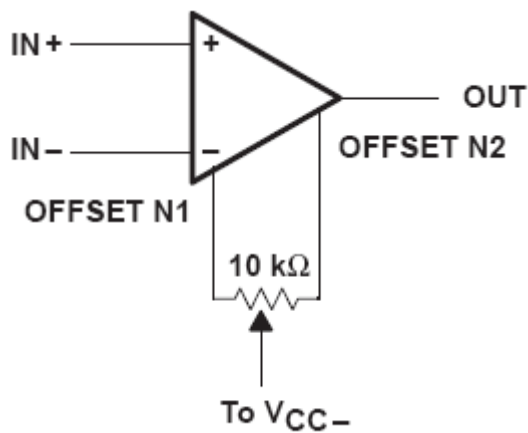
b.uA741 接腳圖



圖(二)：運算放大器的包裝與接腳[1]

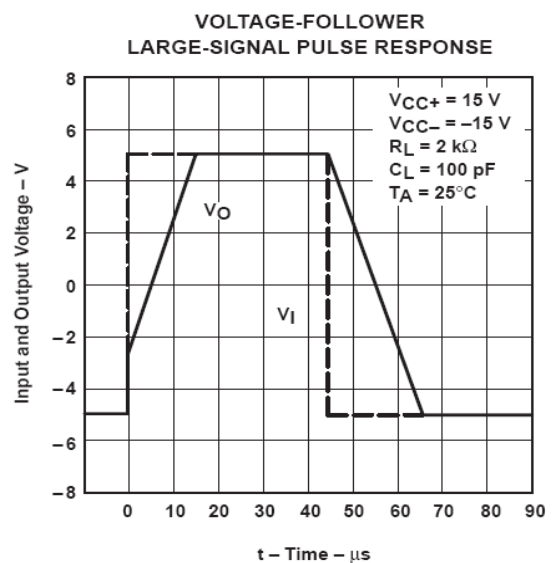
■uA741 電氣特性

a.Input offset voltage null circuit



運算放大器偏差歸零端子，外接可變電阻，以平衡 OPA 內部電路不匹配，使得 $V_{OS}=0V$ 。

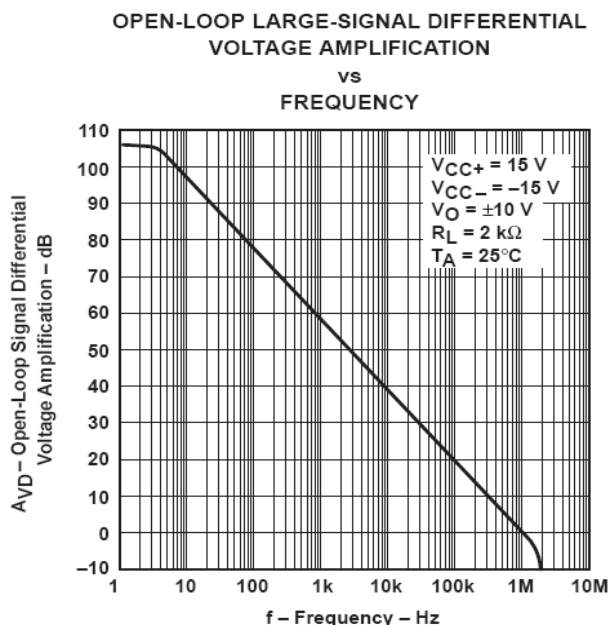
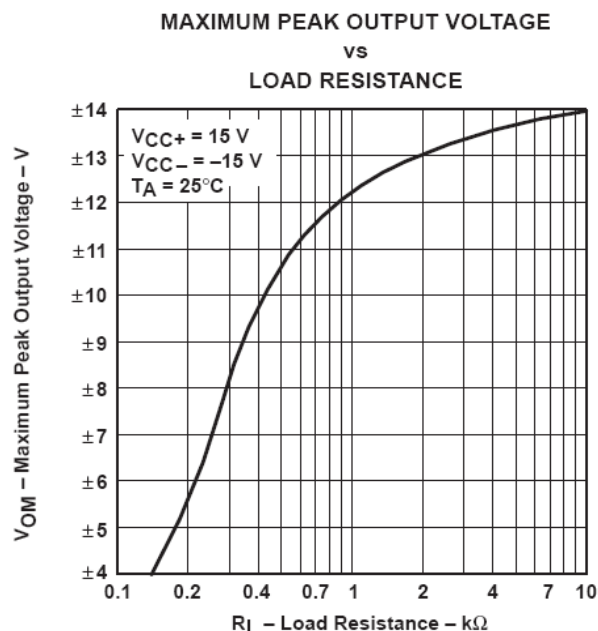
b.Large-Signal Pulse Response



圖(3-a). 運算放大器的電器特性[1]

c. 電氣特性(at specified virtual junction temperature, $V_{CC\pm} = \pm 15\text{ V}$)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	$T_A^{(1)}$	μA741C			μA741M			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
V_{IO} Input offset voltage	$V_O = 0$	25°C		1	6		1	5	mV
		Full range			7.5		±15	6	
$\Delta V_{IO(\text{adj})}$ Offset voltage adjust range	$V_O = 0$	25°C		±15			20	200	mV
I_{IO} Input offset current	$V_O = 0$	25°C		20	200			500	nA
		Full range			300			500	
I_{IB} Input bias current	$V_O = 0$	25°C		80	500		80	500	nA
		Full range			800			1500	
V_{ICR} Common-mode input voltage range		25°C	±12	±13		±12	±13		V
		Full range	±12			±12			
V_{OM} Maximum peak output voltage swing	$R_L = 10\text{ k}\Omega$	25°C	±12	±14		±12	±14		V
	$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	Full range	±12			±12			
	$R_L = 2\text{ k}\Omega$	25°C	±10			±10	±13		
	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	Full range	±10			±10			
A_{VD} Large-signal differential voltage amplification	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	25°C	20	200		50	200		V/mV
	$V_O = \pm 10\text{ V}$	Full range	15			25			
r_i Input resistance		25°C	0.3	2		0.3	2		M Ω
r_o Output resistance	$V_O = 0$, See ⁽²⁾	25°C		75			75		Ω
C_i Input capacitance		25°C		1.4			1.4		pF
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICR\text{min}}$	25°C	70	90		70	90		dB
		Full range	70			70			
k_{SVS} Supply voltage sensitivity ($\Delta V_{IO}/\Delta V_{CC}$)	$V_{CC} = \pm 9\text{ V}$ to $\pm 15\text{ V}$	25°C		30	150		30	150	$\mu\text{V/V}$
		Full range			150			150	
I_{OS} Short-circuit output current		25°C		±25	±40		±25	±40	mA
I_{CC} Supply current	$V_O = 0$, No load	25°C		1.7	2.8		1.7	2.8	mA
		Full range			3.3			3.3	
P_D Total power dissipation	$V_O = 0$, No load	25°C		50	85		50	85	mW
		Full range			100			100	

d. Frequency Response**e. 最大輸出電壓對負載關係圖**

圖(三)：運算放大器的電器特性[1]

圖(三)為運算放大器非理想的電器特性，這裡節錄了 IC Data Sheet 中的直流偏移補償電路、大訊號脈波響應特性、電氣特性、開迴路大訊號差動放大器

增益對頻率的特性及最大峰值輸出電壓對負載電阻的關係等特性，其他運算放大器的非理想特性可以參閱電子學課本。

五、電路說明

1. 運算放大器[2][3][4][5]

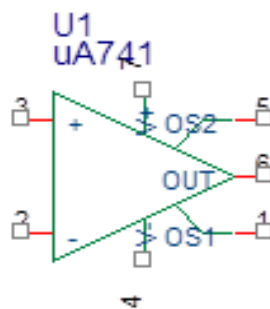
理想的 OP Amp 的輸入端子並沒有電流流入（或流出）。也即是輸入阻抗 Z_i 為無限大。電壓增益 A_v 為無限大。根據這些條件，可以得到輸入輸出關係如下。

$$V_+ - V_- = \frac{V_o}{A_v}$$

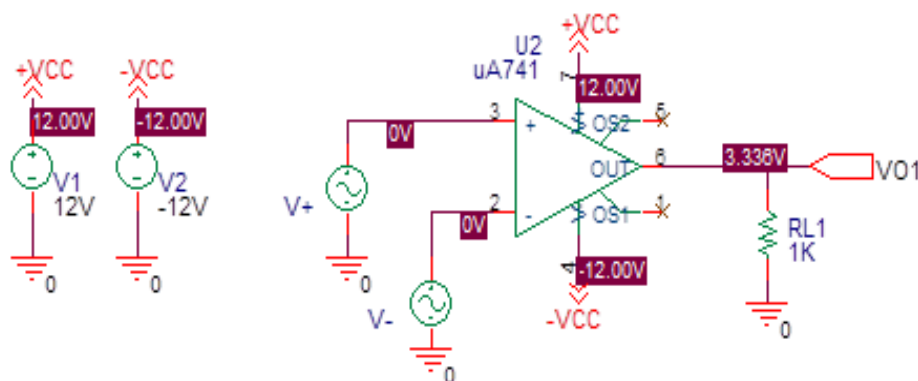
假設 $A_v = \infty$ ，則表示 $V_+ - V_- = 0$ ， $V_+ = V_-$ ，表示理想的 OP Amp 在做為放大作用時，兩個輸入端子的電位為相同，表示輸入端為「虛短路」。又 $Z_i = \infty$ ，表示輸入端為「開路」。這兩種特性都可以成立，也是所謂的「虛接地」觀念。

因此，理想的 OP Amp 具有以下特性：

- a. $Z_i = \infty$ （輸入端沒有電流流通）
- b. $V_+ = V_-$ （ $A_v = \infty$ ）



圖(四)：運算放大器的電路符號



圖(五)：運算放大器的輸入/輸出電壓

圖(四)所示為 OP Amp 的電路符號。[-]符號端子為反相輸入端子，[+]符號端子為非反相輸入端子。圖(五)所示為 OP Amp 的各端子電壓為 V_+ 、 V_- 、 V_o ，其輸入出的關係式如右所示 $V_o = A_v(V_+ - V_-)$ 。

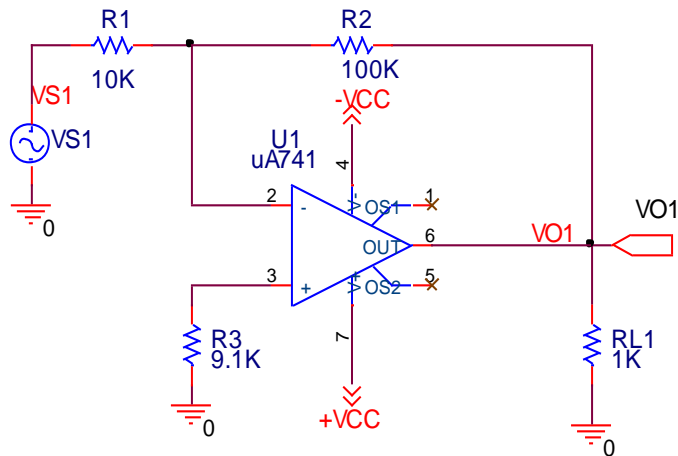
上式 OP Amp 可將加在兩個輸入端子的電壓差放大 A_v 倍，此 A_v 稱為 OP Amp 的差動電壓增益或稱之為開迴路電壓增益(Open loop Gain)。對於直流信號(DC)而言，OP Amp 的開迴路電壓增益很高，約為 $10^5 \sim 10^7$ (100 dB ~140 dB)，但是當輸入信號的頻率越高，則此一增益值會越下降。

若輸入 $V_+ = V_- = 0V$ 加在兩個輸入端子，則可得到沒有交流信號輸出，即是在兩個輸入端子上加入相同的輸入信號時，輸出交流信號會被 +、- 抵消為 0。但是，實際上，輸出端子會有直流輸出電壓，經由模擬結果，其直流輸出值 = 3.336V，見圖(五)，因 OP Amp 的開迴路電壓增益很高，故有較大的直流輸出值。

2.反相放大器電路

圖(六)所示為使用 OP Amp 做為反相放大器的電路。輸入訊號經串聯電阻 R_1 接至反相輸入端，由輸出端子經由 R_2 而回授(Feedback)至反相輸入端子。此一回授的信號與輸入信號的極性相反，因此稱之為負回授。一般放大器使用

的 OP Amp 常利用控制回授量大小以得到所希望的增益。



圖(六)：反相放大器

下列的推導是為求出反相放大器的增益，可由 PSPICE 模擬出結果。

參閱圖(六)：反相放大器。假設此為理想的 OP Amp，則兩個輸入端子的電位為相同，由於非反相輸入端子為接地，因此，反相輸入端子的電位也成為 0V，也即是流入 R1 的電流 I_1 ，流過 R2 的電流 I_2 分別為

$$I_1 = \frac{VS1 - 0}{R1} = \frac{VS1}{R1} \quad (8-1)$$

$$I_2 = \frac{0 - VO2}{R2} = -\frac{VO2}{R2} \quad (8-2)$$

在理想的 OP Amp 中，並沒有電流流入輸入端子， I_1 全部流入 R2，也即是 $I_1 = I_2$ 。

$$\frac{VS1}{R1} = -\frac{VO2}{R2} \quad (8-3)$$

由此可以得到反相放大電路的增益 A 為

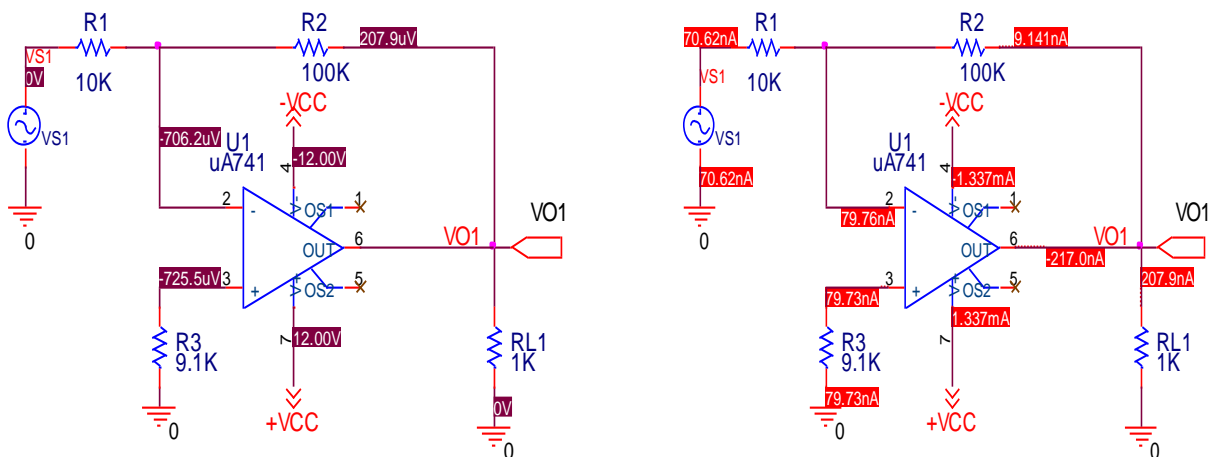
$$A = \frac{VO2}{VS1} = -\frac{R2}{R1} \quad (8-4)$$

由此可以看出增益是由外加的電阻值所決定的。[-]符號代表輸入、輸出相位為反相關係。

此一反相放大器的反相輸入端子，具有對 GND 而言的 0V 電位，因此，也

稱之為假想接地點 (Virtual Ground 或 Imaginary Ground)。

在實際的 OP Amp 中，於輸入端子有微小的電流通過。此一電流稱之為輸入偏壓電流，在雙極性輸入型的 OP Amp 為數 nA~數 μ A，在 FET 輸入型約為數十 pA，補償電阻 $R3=(R1//R2)$ ，此補償電阻可抑制因輸入偏壓電流所造成的輸出偏壓。在反相放大器電路中，兩個輸入端子之間存在有微小的直流電位差，此稱之為輸入補偏電壓(input offset voltage)。由於此一輸入補偏電壓受到放大，因此在輸出有輸出直流偏差電壓=207.9uV，如圖(七)所示。通常 OP Amp 的輸入補偏電壓，一般值為 1mV，最大值為 6mV。



圖(七)：反相放大器輸出直流偏差電壓與電流

今以實際的 OP Amp 求出增益與前述式子比較其誤差程度。為了避免煩雜的計算，在此令 $Z_i = \infty$ 、 A_v 設為有限值計算。由於 A_v 為有限值，假設反相輸入端子的電壓為 V_- ， $V_- \neq 0V$ 。因沒有電流流入 OP Amp 的輸入端子，因此 $I_1 = I_2$ ，

$$\frac{VS1 - V_-}{R1} = \frac{V_- - VO1}{R2} \quad (8-5)$$

$VO1$ 為輸入端子間電壓的 A_v 倍，因此

$$VO1 = A_v (0 - V_-) = -A_v V_- \quad (8-6)$$

由 (8-5)，(8-6) 式子可以得到增益 A' 為

$$A' = -\frac{R2}{R1 + (R1 + R2)/A_v} \quad (8-7)$$

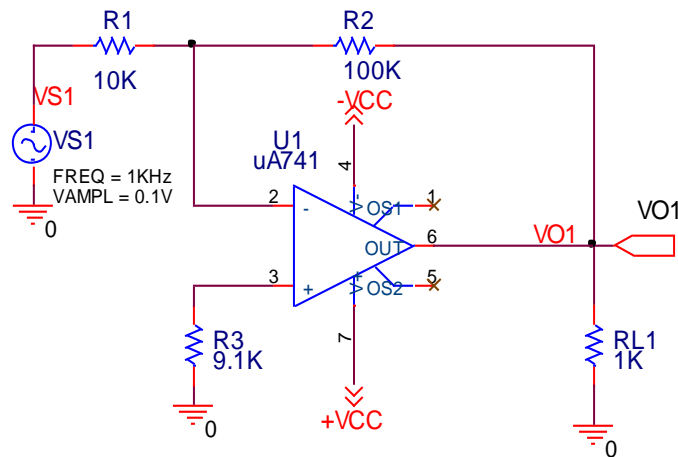
此與式 (8-6) 所求得的增益相比較，其誤差為

$$E = \frac{A - A'}{A'} \times 100\% = \frac{R1 + R2}{R1 \cdot A_v} \times 100\%$$

將實際的數值代入，假設 $R1 = 10K\Omega$ ， $R2 = 100K\Omega$ ， $A = 20dB$ (10 倍) 的反相放大器，若在 $1KHz$ 時 $A_v = 70dB [\approx 3.2 \times 10^3]$ 時， E 如下式(8-8)：

$$E = \frac{10K\Omega + 100K\Omega}{10K\Omega \times 3.2 \times 10^3} \times 100\% \approx 0.344\% \quad (8-8)$$

由此可以看出其誤差很小，此為一般電路所使用的電阻本身誤差 (1%~5%) 以下。可是，假設 OP Amp 的開迴路增益很小，而要設計出較高的電壓增益的放大器時，必須注意使用此一近似式子的誤差。



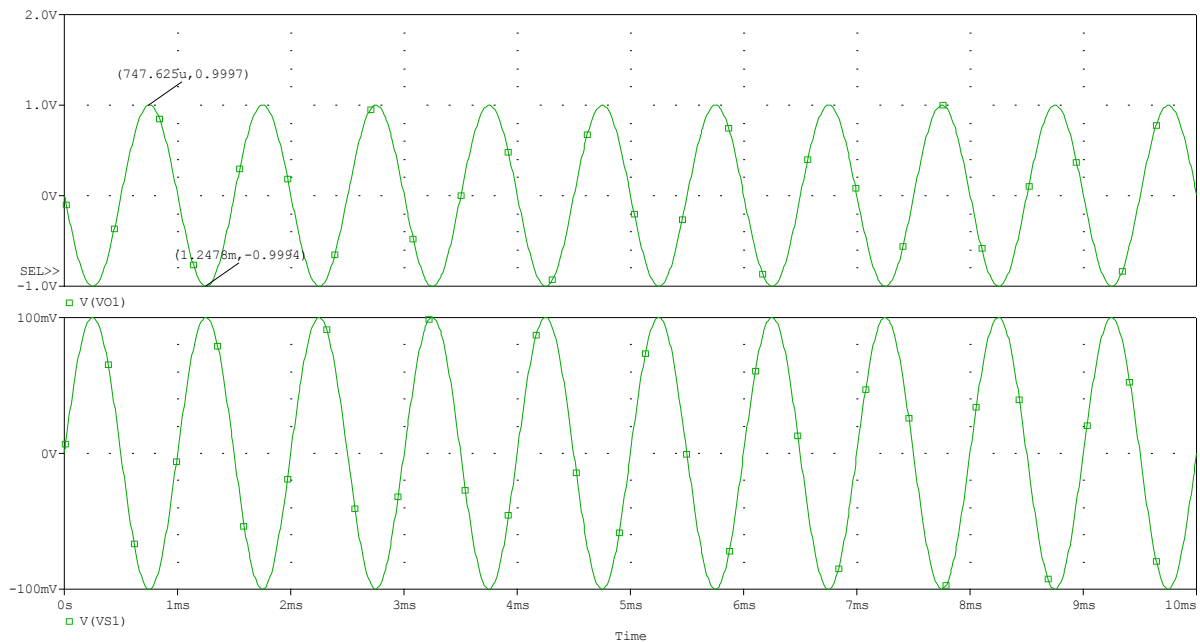
圖(八)：增益 20dB 反相放大器

圖(八)所示的為增益為 20dB 的反相放大器的電路。在非反相輸入端子加入電阻 $R3$ ，主要是要使由各輸入端子所看進去的阻抗為相同，可以防止輸入偏壓電流所產生的 offset 電壓。在圖(六)電路中，由反相輸入端子所看進去的阻抗為 $R1//R2$ ，而 $R3 = 10K\Omega // 100K\Omega \approx 9.1K\Omega$ 。將非反相輸入端子直接接地，或者利

用 R3 接地，由於電位為 0V，對於電路的動作不會有很大影響。在 FET 輸入型的 OPamp，輸入偏壓電流很小，可省略 R3。

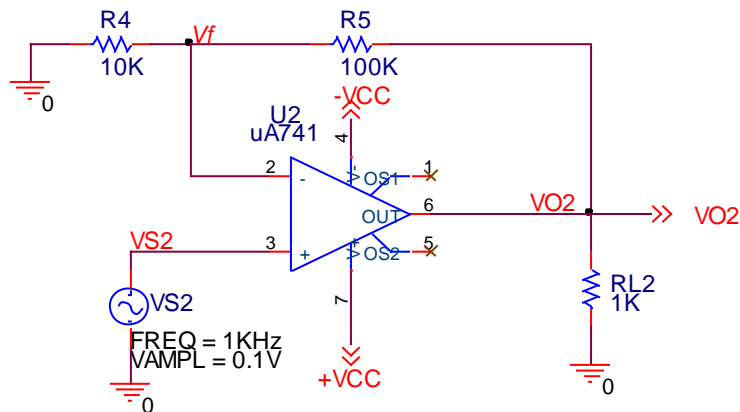
此電路的反相輸入端子為 0V（假想接地點），因此輸入阻抗 $Z_i = R1$ ，也即是成為 $10K\Omega$ 。

圖(九)為其輸入出波形的模擬圖，由此可以看出其增益為 20dB（10 倍），輸入出相位成為反相。



圖(九)：反相放大器輸入/輸出(VS1/VO1)模擬結果

3.非反相放大器電路



圖(十)：非反相放大器

圖(十)所示的為非反相放大器。將輸入信號加在非反相輸入端子，輸出信號

由 R5、R4 回授至反相輸入端子，成為負回授狀態。R5 及 R4 組成分壓電路，使得反相輸入端取得一回授電壓 $V_f = \left(\frac{R4}{R4 + R5} \right) VO2$ 。

假設此為理想 OP Amp，輸入電壓為 VS2，則反相輸入端子的電壓 V-也為 VS2，流入 R5 的電流為 I₅，流過 R4 的電流為 I₄。

$$I_4 = \frac{VS2 - 0}{R4} = \frac{VS2}{R4} \quad (8-9)$$

$$I_5 = \frac{VO2 - VS2}{R5} \quad (8-10)$$

由於沒有電流流入反相輸入端子

因此

$$I_4 = I_5, VO2 = \left(1 + \frac{R5}{R4} \right) VS2 \quad (8-11)$$

電路的增益 A 成為

$$A = \frac{VO2}{VS2} = 1 + \frac{R5}{R4} \quad (8-12)$$

上述與反相放大電路不同，A 沒有（－）符號，因此，輸入與輸出的相位為同相。

接著，也以實際的 OP Amp 電路討論，假設開迴路增益 A_v 為有限值。現在以實際的 OP Amp 作為非反相放大電路時的增益與（8-12）式所得到增益作為比較，求其誤差。

假設反相輸入端子的電位為 V-，則

$$I_4 = \frac{V_- - 0}{R4} = \frac{V_-}{R4} \quad (8-13)$$

$$I_5 = \frac{VO2 - V_-}{R5} \quad (8-14)$$

Z_i = ∞，I₄ = I₅，由（8-13），（8-14）可以得到

$$VO2 = \left(1 + \frac{R5}{R4}\right) V_- \quad (8-15)$$

OP Amp 的輸出 VO2 為將輸入端子間的電壓放大 A_v 倍，也即是

$$VO2 = (VS2 - V_-) \times A_v$$

$$V_- = VS2 - \frac{VS2}{A_v} \quad (8-16)$$

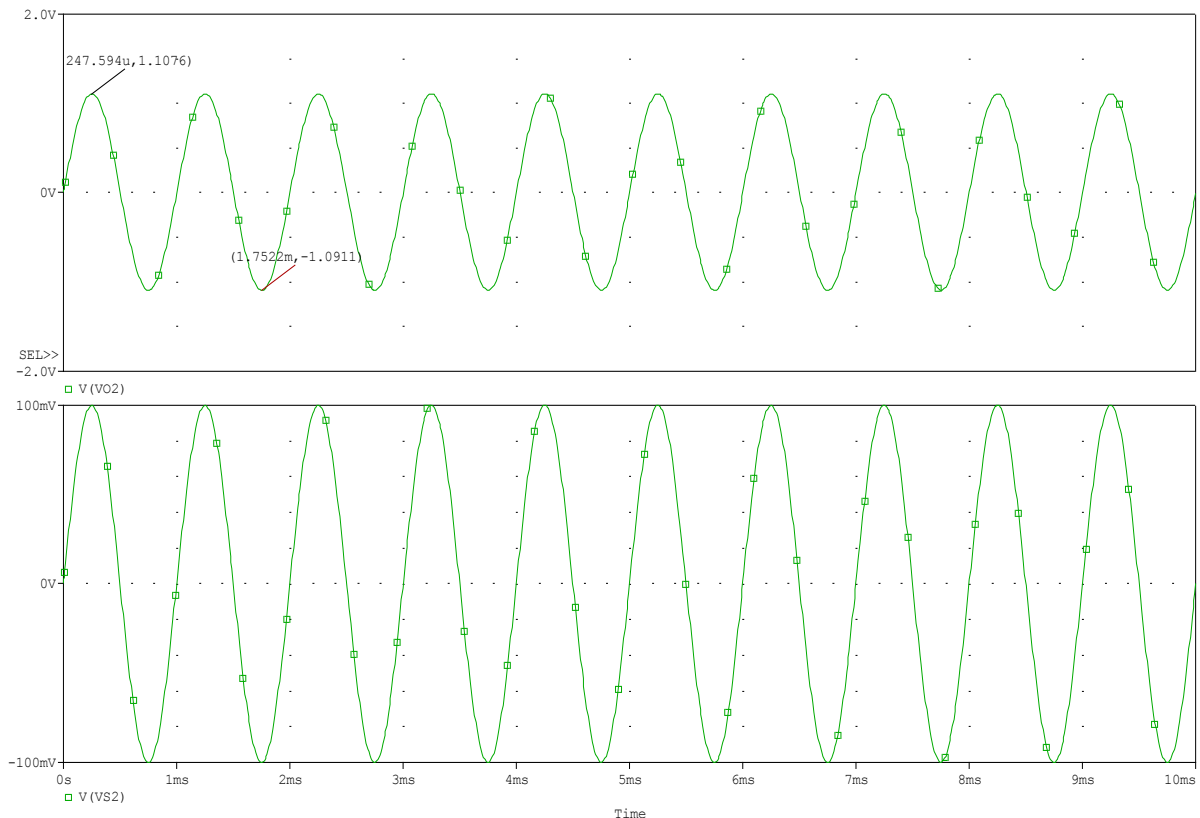
由 (8-15)，(8-16) 式可以得到增益 A' 為

$$A' = \frac{1 + \frac{R5}{R4}}{1 + \frac{1}{A_v} \left[1 + \frac{R5}{R4}\right]} \quad (8-17)$$

此與 (8-12) 式所求得之增益 A 比較，其誤差 E 為

$$E = \frac{A - A'}{A'} \times 100\% = \frac{R4 + R5}{R4 \cdot A_v} \times 100\% \quad (8-18)$$

此與反相放大器相同，實際上具體的誤差值並不很大。

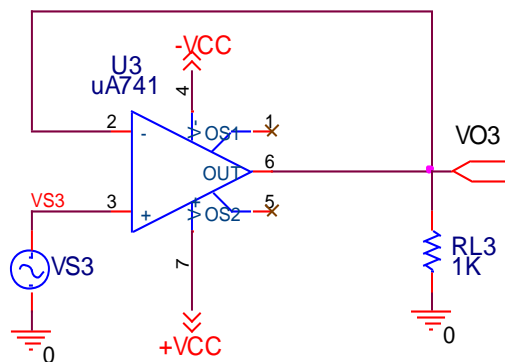


圖(十一)：非反相放大器輸入/輸出(VS2/VO2)模擬結果

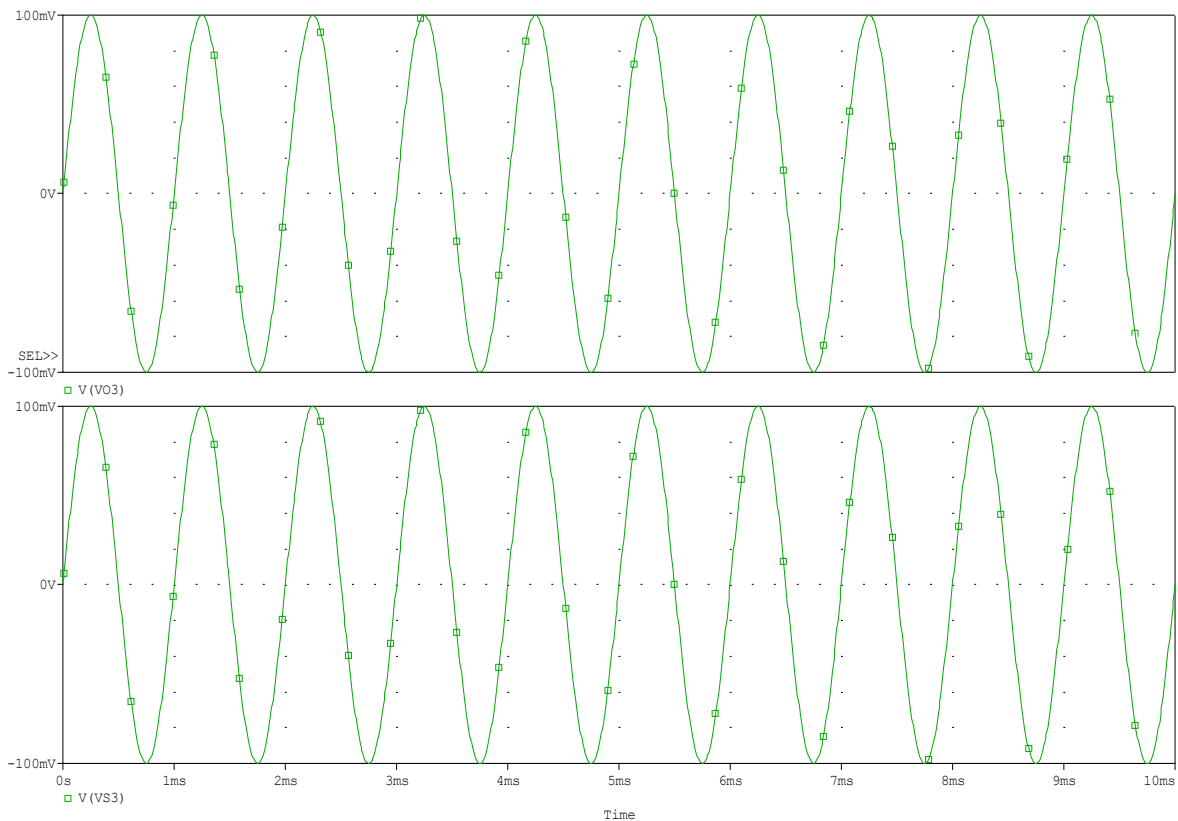
圖(十)所示為實際的非反相放大器。 $R_4=10K\Omega$ ， $R_5=100K\Omega$ ，增益為 11 倍 (20.83dB)。由於 OP Amp 的輸入阻抗很大，故非反相放大器的輸入阻抗可視為 OP Amp 的輸入阻抗 $Z_i=\infty$ 。

圖(十一)為非反相放大器電路輸入/輸出波形的模擬圖，由此可以得到增益約為 11 倍(20.83dB)，輸入出相位為同相位關係。

4.單位增益放大器電路(緩衝放大器)



圖(十二)：單位增益放大器

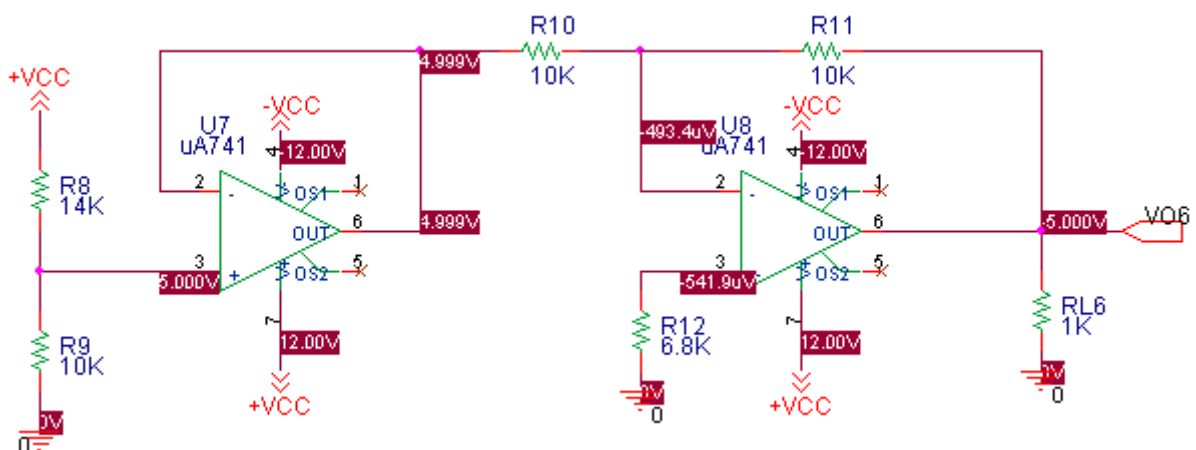


圖(十三)：單位增益放大器輸入/輸出(VS3/VO3)模擬結果

圖(十二)：單位增益放大器電路。輸入電壓 $VS3$ 接在(+)端，由於 OP amp 的假想接地點，故 $VO3=VS3$ ，電壓增益 $A_v = \frac{VO3}{VS3} = 1$ 。

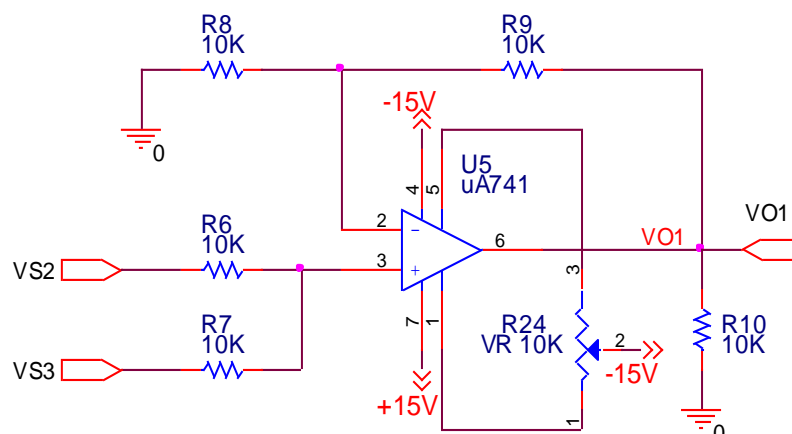
使用單增益放大器的主要原因是它的輸入阻抗非常高及低輸出阻抗的特性，一般應用在電路的界面上，例如訊號源與輸入電路間加入一級緩衝放大器，做為阻抗匹配使用，以維持訊號源的訊號位準。

單位增益放大器的應用電路—圖(十四)是理想(-5V)電壓源。 $+12V$ 電壓源經由電阻分壓器，在經緩衝放大器、反相放大器，轉換為-5V 電壓源，推動電流在此電路則太小了，是其缺點。



圖(十四)：理想電壓源電路

5.非反相電壓和放大器

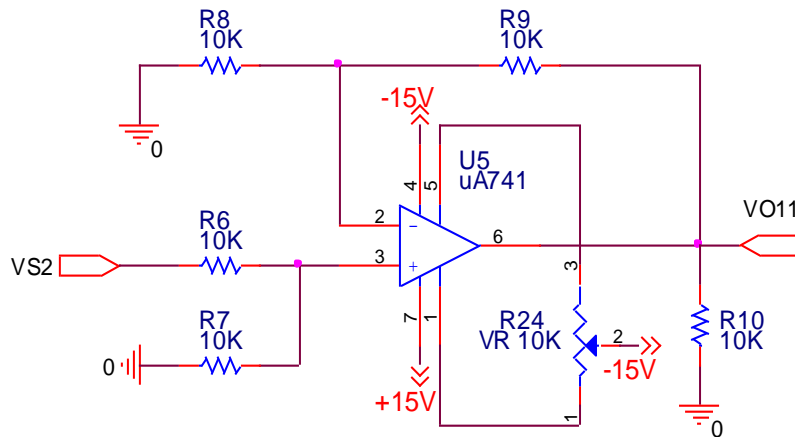


圖(十五)：非反相電壓和放大器

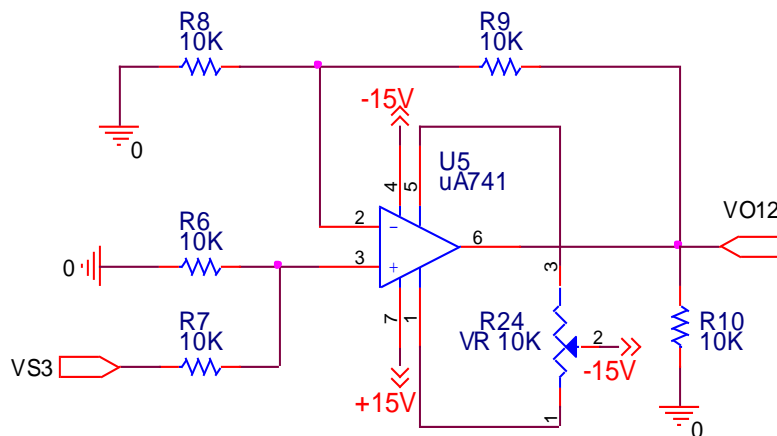
在基本的反相、非反相放大器的電路中，使用負回授電路，就可以完成輸出電壓為各輸入電壓的加權和(Weighted sum)，下列將介紹電壓和放大器及電壓差放大器。

反相電壓和放大器與非反相放大器的的工作原理相似，只是非反相電壓和放大器有兩個(或兩個以上)的輸入端。圖(十五)為兩個輸入端的非反相電壓和放大器。分析此電路需使用電路學重疊定理。

考慮 VS2 作用時，將 VS3 電壓源短路，如圖(十六)所示。



圖(十六)：輸入電壓 VS2 之作用



圖(十七)：輸入電壓 VS3 之作用

①. “+輸入端”之電壓 $V(+)=VS2 \times \frac{R7}{R6+R7}$ 。

②. 輸出 “VO11”之電壓

$$VO11 = V(+)\times\left(1 + \frac{R9}{R8}\right) = VS2 \times \left(\frac{R7}{R6 + R7}\right) \times \left(1 + \frac{R9}{R8}\right) \quad (8-19)$$

考慮 VS3 作用時，將 VS2 電壓源短路，如圖(十七)所示。

①. “+輸入端”之電壓 $V(+)=VS3 \times \frac{R6}{R6 + R7}$ 。

②. 輸出 “VO12”之電壓

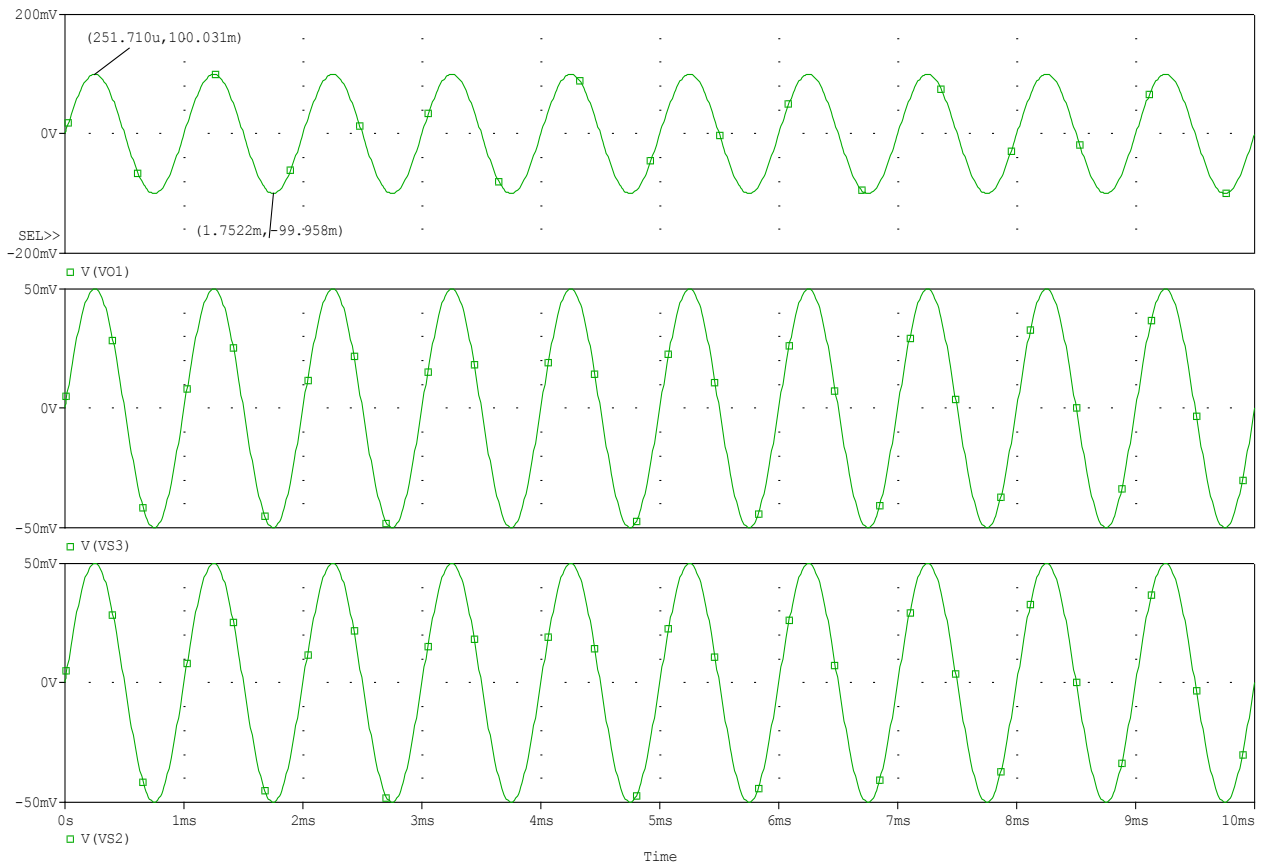
$$VO12 = V(+)\times\left(1 + \frac{R9}{R8}\right) = VS3 \times \left(\frac{R6}{R6 + R7}\right) \times \left(1 + \frac{R9}{R8}\right) \quad (8-20)$$

當輸入電壓同時加入時，在輸出端所產生之電壓

$$VO1 = VO11 + VO12 = \left(VS2 \times \frac{R7}{R6 + R7} + VS3 \times \frac{R6}{R6 + R7} \right) \times \left(1 + \frac{R9}{R8} \right) \quad (8-21)$$

若選取電阻值 $R6=R7=R8=R9=R$ ，則輸出電壓 VO1

$$VO1 = VS2 + VS3 \quad (8-22)$$



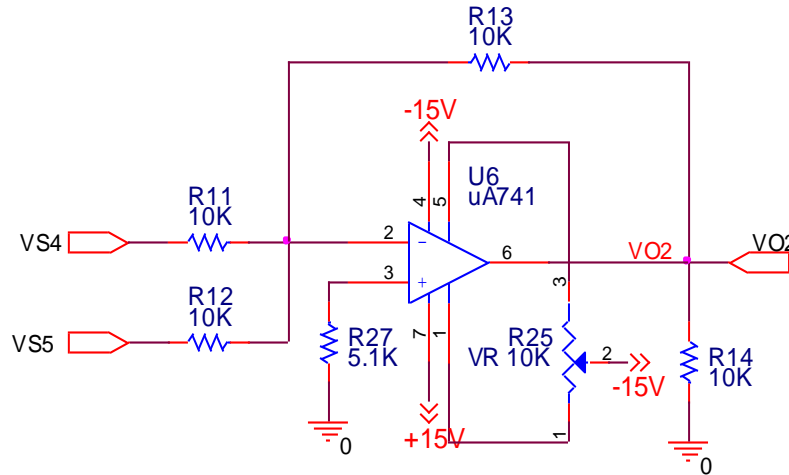
圖(十八)：非反相電壓和放大器電路模擬結果

以上可以得到，電路的輸出電壓為各輸入電壓相加的結果，因此被稱為加

法器(adder)。

電路模擬結果如圖(十八)所示，輸入電壓(V_{p-p}) = 100mV，輸出電壓 VO1(V_{p-p}) = 200mV。

6.反相電壓和放大器



圖(十九)：反相電壓和放大器

反相電壓和放大器與反相放大器的工作原理相似，只是反相電壓和放大器有兩個(或兩個以上)的輸入端。圖(十九)為兩個輸入端的反相電壓和放大器，輸入電壓分別為 VS4 及 VS5，輸入電流則分別為 I_{R11} 及 I_{R12} ，R27 為輸出直流偏差補償電阻。因運算放大器的輸入阻抗 = ∞ ，且輸入端為虛接地，故反相輸入端的電壓約為 0V，輸入端電流亦為零，依據電路學 KCL 定律可知， $I_{R13} = I_{R11} + I_{R12}$ 。

$\therefore VO22 = -I_{13} \times R13$ ，可得

$$VO22 = -(I_{R11} + I_{R12}) \times R13 = -\left(\frac{VS4}{R11} + \frac{VS5}{R12}\right) \times R13 = -\left(\frac{R13}{R11} \times VS4 + \frac{R13}{R12} \times VS5\right) \quad (8-23)$$

上式表示輸出電壓 VO22 為兩輸入信號依不同的放大倍率放大後的電壓總和。

a.若 $R11 = R12 = R \neq R13$ ，則

$$VO2 = -\left(\frac{R13}{R}\right)(VS4 + VS5) \quad (8-24)$$

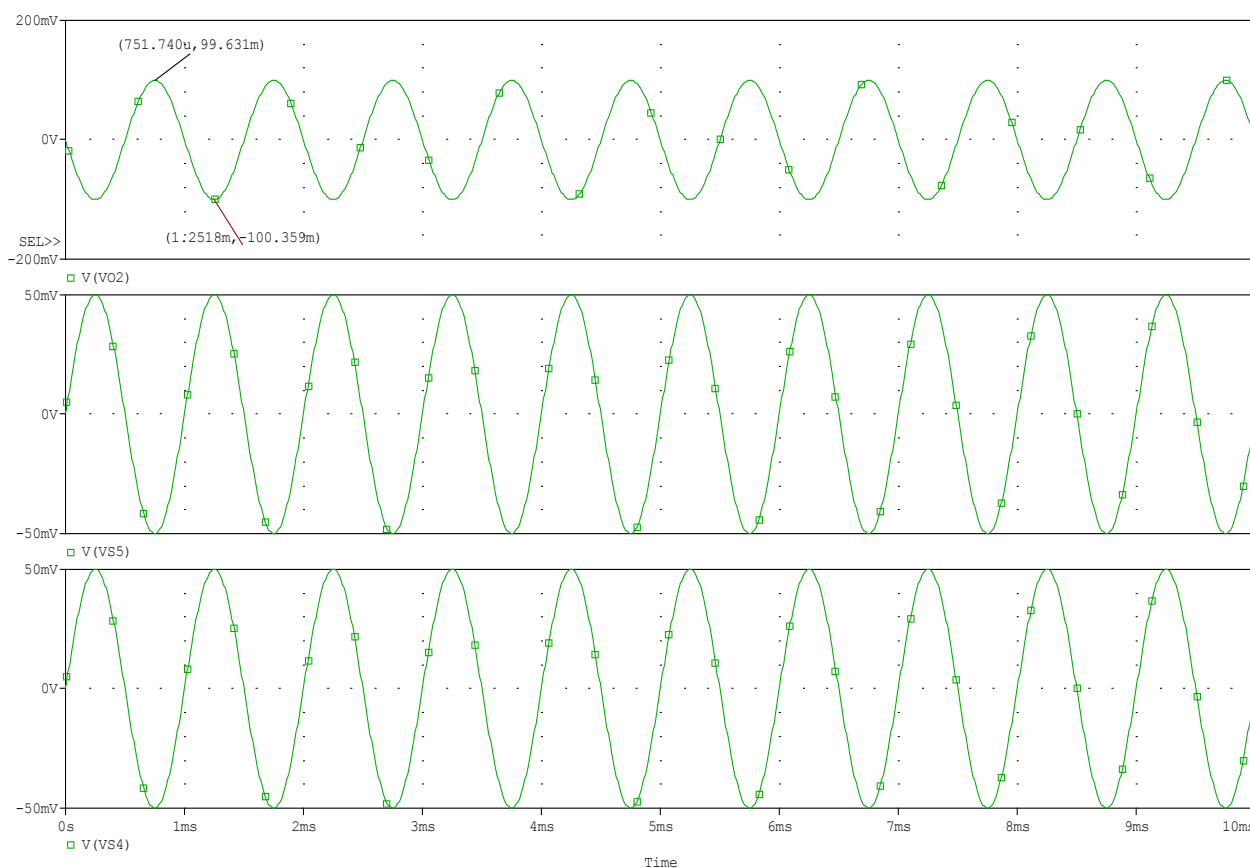
上式表示輸出電壓為兩輸入電壓和的 $\left(-\frac{R_{13}}{R}\right)$ 倍。

b.若 $R_{11}=R_{12}=R_{13}=R$ ，則

$$VO_{22} = -\left(\frac{VS_4}{R} + \frac{VS_5}{R}\right) \times R = -(VS_4 + VS_5) \quad (8-25)$$

由上可知，反相電壓和放大器的輸出電壓為兩輸入電壓和的負值。

c.電路模擬結果如圖(二十)所示，輸入電壓(V_{P-P})=100mV，輸出電壓 $VO_2(V_{P-P})$
= -200mV。

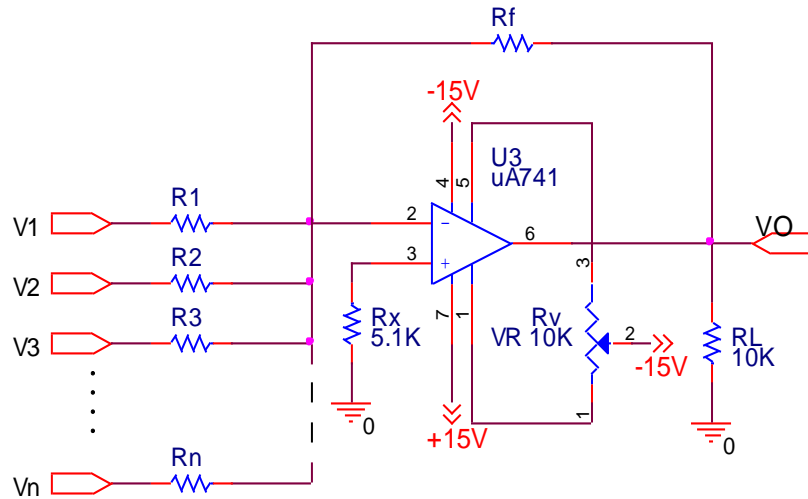


圖(二十)：反相電壓和放大器電路模擬結果

d.若輸入電壓為 V_1 、 V_2 、 $V_3...V_n$ ，如圖(二十一)，則輸出電壓如下：

$$VO = -\left(\frac{R_f}{R_1} \times V_1 + \frac{R_f}{R_2} \times V_2 + \frac{R_f}{R_3} \times V_3 + \dots + \frac{R_f}{R_n} \times V_n\right) \quad (8-26)$$

上式(8-26)表示輸出電壓為輸入信號依不同的放大倍率放大後的電壓總和。

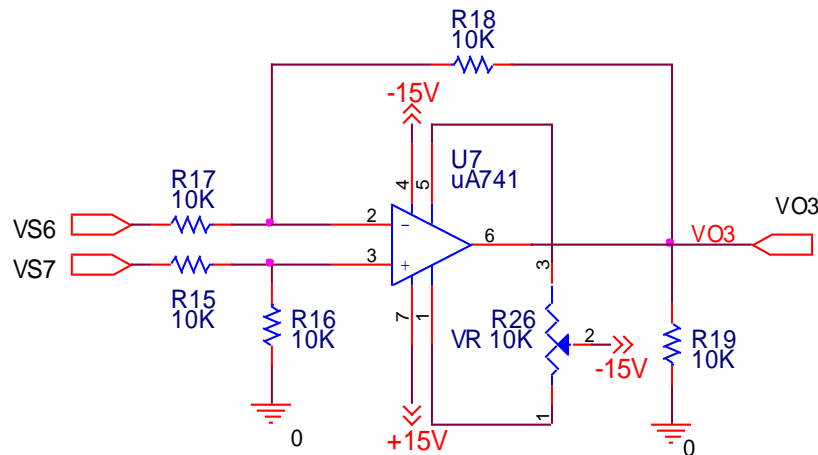


圖(二十一)：n 個輸入反相電壓和放大器

7.電壓差放大器電路(儀表放大器)

電壓差放大器又稱為差額放大器或儀表放大器(Instrumentation amplifier)，

如圖(二十二)所示。



圖(二十二)：電壓差放大器

在感測電路的應用中，換能器(transducer)為將物理量及其變化轉變為「電氣」信號得裝置。例如：應力計、熱電偶(溫度感測)及熱線流速計程(流體流動)，為這種換能器的實例。每一種換能器產生一小的差值信號，通常需要放大。電壓差放大器(儀表放大器)提供的輸出正是兩輸入信號差值的準確倍數，即輸出是兩個輸入電壓信號之間的差額有關且成正比關係。

分析此電路仍然使用重疊定理，並假設運算放大器的輸入電流可忽略不計，

得

$$VO33 = \left(\frac{R16}{R15 + R16} \right) \times \left(1 + \frac{R18}{R17} \right) \times VS7 - \left(\frac{R18}{R17} \right) \times VS6 \quad (8-27)$$

若 $\frac{R15}{R16} = \frac{R17}{R18}$ ，則

$$VO33 = \left(\frac{R18}{R17} \right) \times (VS7 - VS6) \quad (8-28)$$

上式(8-27)表示 VO33 與(VS7－VS6)成正比。

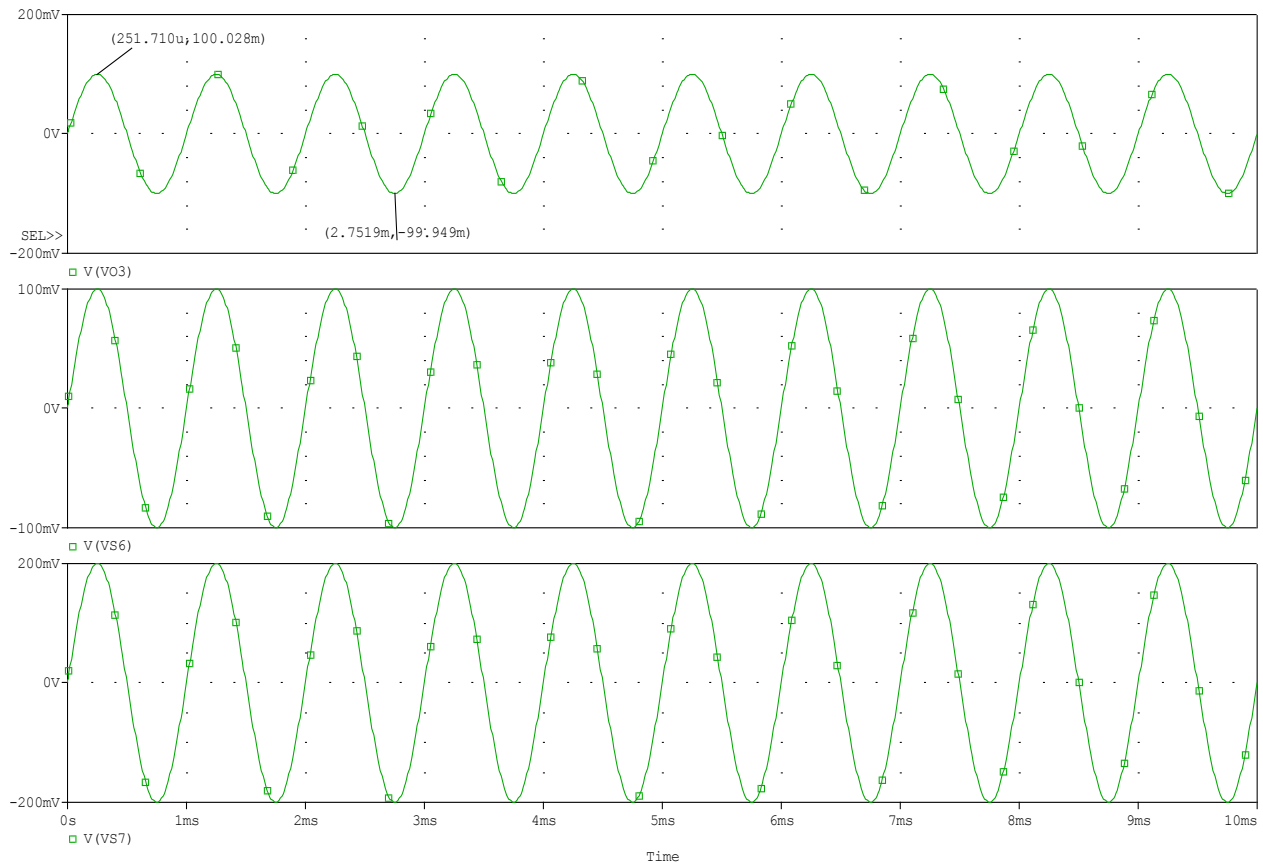
若 $R15 = R16 = R17 = R18 = R$ ，則

$$VO33 = (VS7 - VS6) \quad (8-29)$$

上式(8-28)表示輸出為輸入的電壓差額關係，即輸出為各輸入電壓相減之結

果，因此被稱為減法器(subtractor)。

c. 電路模擬結果如圖(二十三)所示，VS6 輸入電壓(V_{p-p})=200mV，VS7 輸入電壓(V_{p-p})=400mV，輸出電壓 VO33(V_{p-p})=200mV。



圖(二十三)：電壓差放大器電路模擬結果

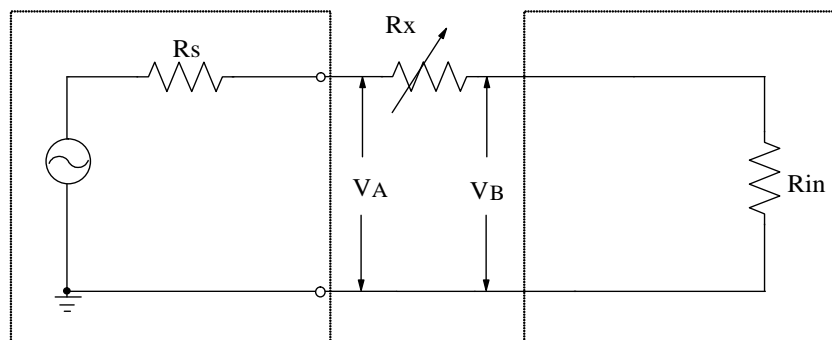
8. 運算放大器的輸入阻抗(R_{in})

參閱圖(二十四)，運算放大器的輸入阻抗的測量方法，如下所示：

- 調整 R_X ，使得 $v_B = \frac{1}{2}v_A$ ，則 $R_X = R_{in}$ ，移出 R_X 測量，即為輸入阻抗。
- 若 R_{in} 很大，調整 R_X 無法使 $v_B = \frac{1}{2}v_A$ ，則任意 R_X ，將測試值代入下列公式中，計算出運算放大器的 R_{in} 值。

$$v_A = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_X} \times v_A \quad (8-30)$$

$$R_{in} = \frac{R_X}{\frac{v_A}{v_B} - 1} \quad (8-31)$$



圖(二十四)：測量運算放大器輸入阻抗之等效電路

9. 運算放大器的輸出阻抗(R_o)

參閱圖(二十五)，運算放大器的輸出阻抗的測量方法，如下所示：

欲測量運算放大器之輸出阻抗，可在輸出端外加一個負載電阻 R_X ，如圖(二十五)所示，然後利用分壓定理於圖(二十五)之輸出迴路，可得

$$V_B = \frac{R_X}{R_o + R_X} \times V_o \quad (8-32)$$

當尚未加上負載電阻 R_X 時，由運算放大器輸出測量所得之輸出電壓為 $V_A = V_o$ 。

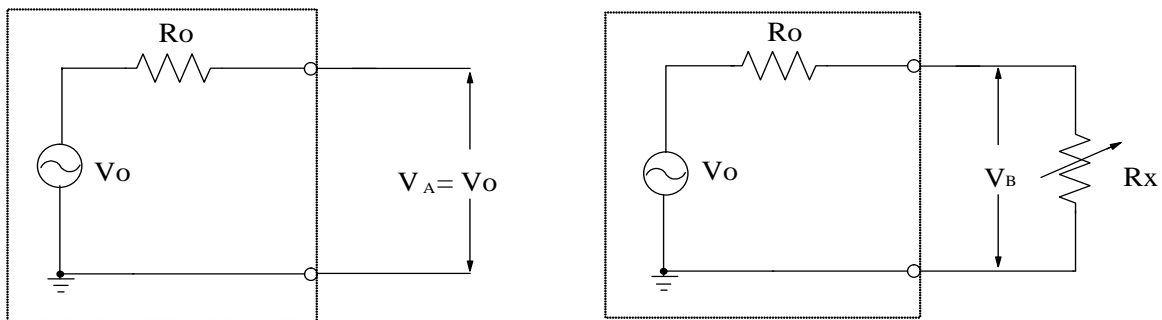
當加上負載電阻 R_X 時，由運算放大器輸出測量所得之輸出電壓為 V_B 。

依前述公式，可得運算放大器的輸出阻抗(R_o)為

$$V_B = \frac{R_X}{R_o + R_X} \times V_o = \frac{R_X}{R_o + R_X} \times V_A \quad (8-33)$$

$$R_o = \left(\frac{V_A}{V_B} - 1 \right) R_X \quad (8-34)$$

調整 R_X ，使得 $V_B = \frac{1}{2} V_A$ ，則放大器輸出阻抗 $R_o = R_X$ 。



圖(二十五)：測量運算放大器輸出阻抗之等效電路

運算放大器的輸出電流，請參閱圖(三)中的電氣特性，Short-circuit output current(TYP= $\pm 25\text{mA}$ ，MAX= $\pm 40\text{mA}$)，表示運算放大器並無法提供高的輸出電流來推動低負載，所以一般如要推動馬達等負載，都會在輸出端增加電晶體或是其他界面電路，以符電路合需求。

六、實驗電路設計值

請依下列表格(三)內容的電壓增益值，完成實驗設計、模擬與實作。

表(三)：各組電壓增益實驗設計要求

組別	反相放大器電壓增益	非反相放大器電壓增益 (加分題)
NO.01～NO.04	-7	7
NO.05～NO.08	-9	9
NO.09～NO.14	-11	11
NO.15～NO.20	-13	13
NO.21～NO.26	-15	15
NO.27～NO.32	-17	17

各組別實驗電路模擬的輸入訊號，依表格(四)而定。

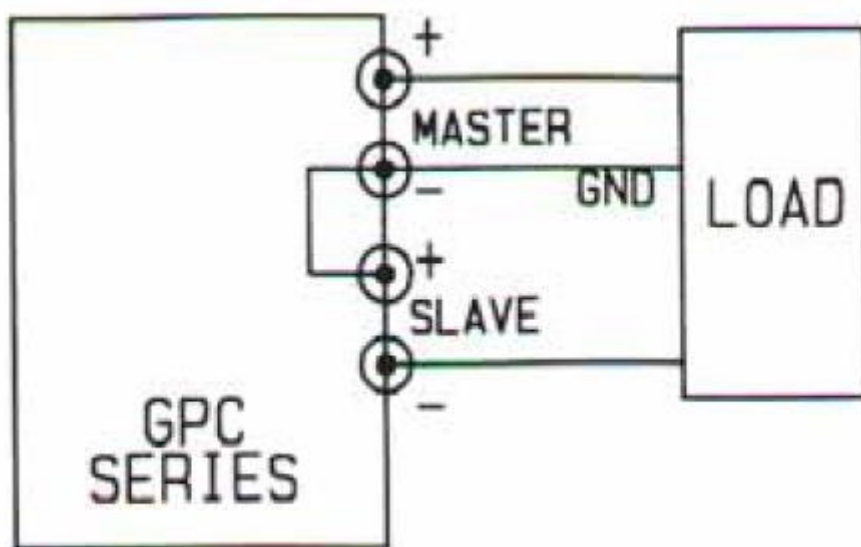
表(四)：各組輸入波形頻率值

組別	輸入頻率	組別	輸入頻率	組別	輸入頻率
No.1-1	1.1KHz	No.11-1	3.1KHz	No.21-1	2.1KHz
No.1-2	1.2KHz	No.11-2	3.2KHz	No.21-2	2.2KHz
No.2-1	1.3KHz	No.12-1	3.3KHz	No.22-1	2.3KHz
No.2-2	1.4KHz	No.12-2	3.4KHz	No.22-2	2.4KHz
No.3-1	1.5KHz	No.13-1	3.5KHz	No.23-1	2.5KHz
No.3-2	1.6KHz	No.13-2	3.6KHz	No.23-2	2.6KHz
No.4-1	1.7KHz	No.14-1	3.7KHz	No.24-1	2.7KHz
No.4-2	1.8KHz	No.14-2	3.8KHz	No.24-2	2.8KHz
No.5-1	1.9KHz	No.15-1	3.9KHz	No.25-1	2.9KHz
No.5-2	2.0KHz	No.15-2	4.0KHz	No.25-2	3.0 KHz
No.6-1	2.1KHz	No.16-1	1.1KHz	No.26-1	3.1KHz
No.6-2	2.2KHz	No.16-2	1.2KHz	No.26-2	3.2KHz
No.7-1	2.3KHz	No.17-1	1.3KHz	No.27-1	3.3KHz
No.7-2	2.4KHz	No.17-2	1.4KHz	No.27-2	3.4KHz
No.8-1	2.5KHz	No.18-1	1.5KHz	No.28-1	3.5KHz
No.8-2	2.6KHz	No.18-2	1.6KHz	No.28-2	3.6KHz
No.9-1	2.7KHz	No.19-1	1.7KHz	No.29-1	3.7KHz
No.9-2	2.8KHz	No.19-2	1.8KHz	No.29-2	3.8KHz
No.10-1	2.9KHz	No.20-1	1.9KHz	No.30-1	3.9KHz
No.10-2	3.0 KHz	No.20-2	2.0KHz	No.30-2	4.0KHz

七、實驗電路計算、電路模擬與實驗項目

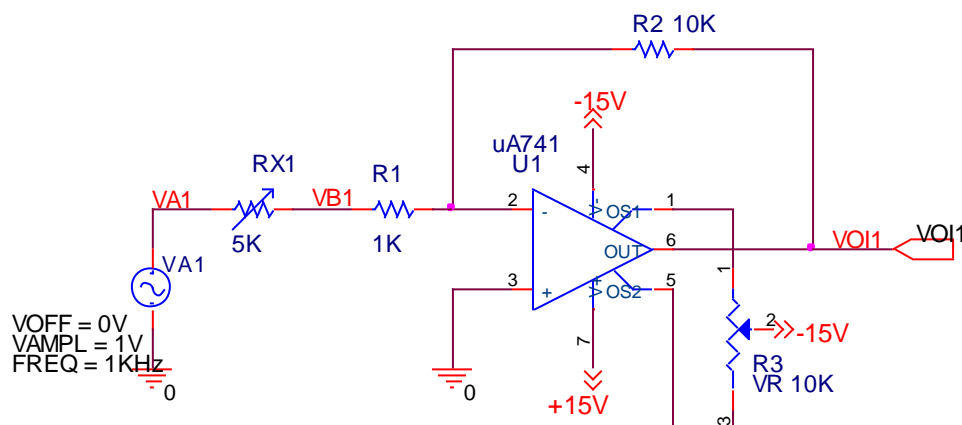
■實驗說明與實驗注意事項：

- 1.依實驗要求，先要設計電阻值，實驗模擬，然後接線。
- 2.實驗測試項目：[壹]～[貳]，完成實驗(每位同學)。
- 3.實驗測試項目：[叁]～[肆]，進階版本(加分項目，依個人學習情況來完成)。
- 4.相關電路模擬項目，請參閱電路模擬結報檔案。
- 5.示波器設定：使用直流耦合，適當調整垂直、水平時間刻度。使用萬用電錶之
注意事項：測量電壓及電阻時，請設定為4位半顯示測量值。
- 6.電源供應器電路設定為串接模式，連線為 $\pm 15V$ 使用。在前面板的 TRACKING
選擇按鍵設定在 SERIES(只按下左邊按鍵)，接在 IC 的接腳 7 及接腳 4。
- 7.本學期實作電路時運算放大器(OP AMP)接腳(1,5)都要接上 VR 10K Ω 可變電阻，VR 中間接腳接負電壓，使用於調整直流偏移量。



圖(二十六)：正負電壓串聯追蹤操作模式

[壹]、測試電路(一)：反相放大器電路輸入阻抗測量(單獨測試)



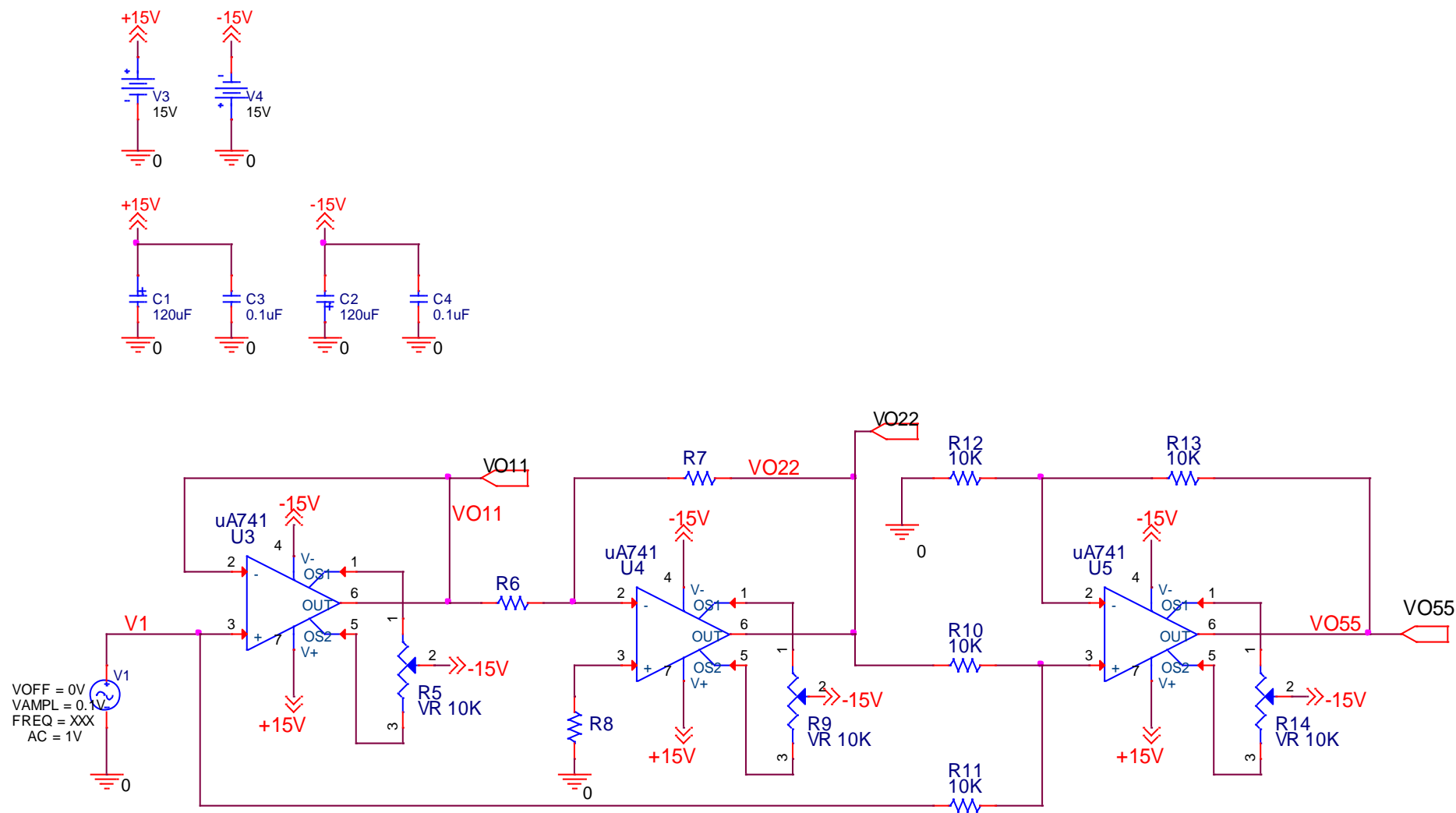
圖(8-1)：反相放大器電路輸入阻抗測試圖

- 1.使用 0.1uF 電源去耦合電容接至 IC 電源接腳。(以下電路皆相同)
- 2.參考前電路說明中圖(三)uA741 Data Sheet內容(Input offset voltage null circuit)，使用10K Ω 可變電阻，提供各級運算放大器電路調整直流偏壓功能。(以下電路皆相同)
- 3.訊號產生器：VA1為峰值(AMPL)1Volt，1KHz之交流電壓(F.G.設定螢幕上)，峰對峰值為2 Volt(示波器設定螢幕上)。
- 4.調整RX1，使得 $VB1 = \frac{1}{2} VA1$ 。RX1移開測量其電阻值=RX1，計算輸入阻抗。
- 5.若VB1無法降至1 V，仍可按照前(8-30)、(8-31)公式來計算 R_{in} (測量值)。
- 6.擷取波形：節點[VA1,VB1]波形，測量 $VA1 = \text{_____} V_{p-p}$ 、 $VB1 = \text{_____} V_{p-p}$ 。
- 7.計算輸入阻抗(請列出計算式)。

表格(8-1)：反相放大器電路輸入阻抗

R1	R2	VA1(Vp-p)	VB1(Vp-p)	RX1	R_{in} (測量值)	R_{in} (理論值)
1K Ω	10K Ω					1K Ω

[貳]、測試電路(二)：反相電壓放大器電路與非反相電壓和放大器測試電路圖



圖(8-2)：反相電壓放大器與非反相電壓和放大器測試電路圖

1.實驗電路設計：參閱圖(8-2)電路圖，自行設計 U4 運算放大器電路中 R6、R7、R8

等電阻值。需列出計算式，繳交上課筆記，列入實驗檢查項目。

a.設計規格：依據表格(三)內容求出電阻值。

b.依據運算放大補偏電流與電壓的特性，回授電阻 R7 會影響其補偏電壓，為了降低補偏電壓，R7 愈小愈好。但 R7 要是愈小時，則會造成輸出負載可能會太大，所以

回授電阻 R7 通常在 10KΩ 到 100KΩ 之間為最適當。

c.參考所附的設計程序資料，計算出最佳的回授電阻 R7，需將下列數值代入(8-35)

計算公式中，列出計算式，不能直接寫出數值 R7。[6]

$$R7(opt) = \sqrt{\left(\frac{R_{id} R_o}{2\beta} \right)} \quad (8-35)$$

其中

①. R_{id} ：運算放大器的差動輸入電阻(2MΩ, +25°C)，選用 2MΩ 電阻。

②. R_o ：運算放大器的輸出電阻(75Ω, +25°C)，選用 75Ω 電阻。

③. β ：R6 與 R7 所構成的電壓回授比(β)，參閱表格(三)各組設定值，代入 A_{vc} 值，

計算出 β 值。

$$\beta = \frac{R6}{R6 + R7} = \frac{1}{1 - A_{vc}} \quad , \quad A_{vc} = -\frac{R7}{R6} \quad (8-36)$$

d.R6 所需要的大小為(8-37)式，代入 $R7(opt)$ ，計算出 R6，選用適當上述電阻。

$$R6 = \frac{-R7(opt)}{A_{vc}} \quad (8-37)$$

e. $R8=R6/R7$ ，選用適當電阻，選用電阻後，需要測量電阻值。

2.運算放大器電路輸出直流位準偏移量之計算與歸零調整。

a.直流位準偏移量(理論值)，含補償電阻($R6//R7$)情況下：其中參閱 IC Data Sheet

$I_{OS} = 20nA$ (Input Offset Current)，代入(8-38)式，計算出 E_{O1} 值。[7]

$$E_{O1} = \left(1 + \frac{R7}{R6}\right) \left[- (R6//R7) (\pm I_{OS}) \right] \quad \text{單位:V} \quad (8-38)$$

b.參閱圖(8-2)電路圖，IC 要接電源接上 $DC\pm 15V$ 。節點[V1]接地 ，節點[V1]直接接地=輸入 0V。

c.示波器設定：輸入通道採用直流耦合，適當調整示波器的垂直刻度(要觀測 mV)，使用電壓測量功能鍵，測量 Vmax。

d.直流位準偏移量之調整(1)：

①.調整可變電阻 R5，觀測節點[VO11]直流電壓變化情形，是□、否□為 mV 值，其電壓範圍是□、否□由 $[-\square\square\square mV \sim +\square\square\square mV]$ 的變化情形。

②.測量節點[VO11]電壓，記錄最低及最高電壓變化範圍值，見表格(8-2)內容，並同時擷取節點[VO11]波形。

③.歸零調整：調整可變電阻 R5，然後將節點[VO11]的電壓調整到節點[VO11] $\cong 0V$ ，
歸零調整後，再次擷取輸出節點[VO11]波形。

e.直流位準偏移量之調整(2)：

①.調整可變電阻 R9，觀測節點[VO22]直流電壓變化情形，是□、否□為 mV 值，其電壓範圍是□、否□由 $[-\square\square\square mV \sim +\square\square\square mV]$ 的變化情形。

②.測量節點[VO22]電壓，記錄最低及最高電壓變化範圍值，見表格(8-2)內容，並同時擷取節點[VO22]波形。

③.歸零調整:調整可變電阻 R9,然後將節點[VO22]的電壓調整到節點[VO22] \cong 0V,

歸零調整後,再次擷取輸出節點[VO22]波形。

f.直流位準偏移量之調整(3):

①.調整可變電阻 R14,觀測節點[VO55]直流電壓變化情形,是□、否□為 mV 值,
其電壓範圍是□、否□由[-○○mV~+○○mV]的變化情形。

②.測量節點[VO55]電壓,記錄最低及最高電壓變化範圍值,見表格(8-2)內容,並
同時擷取節點[VO55]波形。

③.歸零調整:調整可變電阻 R14,然後將節點[VO55]的電壓調整到節點[VO55] \cong 0V,

歸零調整後,再次擷取輸出節點[VO55]波形。

測量上述數據後,可以了解直流偏壓對於放大器的影響(輸出直流電壓的漂移現象)及如何以何種方法來減少運算放大器的誤差。

表(8-2):輸出直流位準偏移量之測試

調整可變電阻	測試節點	記錄電壓變化範圍 (最小值~最大值)
R5	節點[VO11]	~
R9	節點[VO22]	~
R14	節點[VO55]	~

3.輸入正弦波訊號測試電壓增益計算與測量。

a.依電路原理預測各級電壓增益值。

b.因為開環直流增益 A_{vo} 在 $+25^{\circ}\text{C}$ 時最壞的情況最小值為 2×10^5 ，所以實際的電壓增益為下列所示：[6] 將數值代入下列計算式中，計算迴路增益(需附上計算列式)，附於實驗電路模擬報告中。

$$A_{vco}(A_{vo} \neq \infty) = \frac{-R7/R6}{1 + 1/\beta A_{vo}} \quad (8-39)$$

c.參閱原理說明中圖(三)：Data Sheet 的 Open Loop Gain & Frequency 關係圖，可以知道其開環迴路直流增益與頻率的相對應值，見表格(8-3)，接著依據表格(8-3)內容，需先實際測量電阻 R6 及 R7。將各項數值代入(8-39)式中，計算出各頻率下的閉迴路電壓增益值。

表(8-3)：開環迴路直流增益與頻率的相對應值[6]

參數	直流	10Hz	100Hz	1KHz	10KHz	100KHz	1MHz
A_{vo} (理論值)	2×10^5	6.3×10^4	8000	800	80	8	1

d.測量值電阻值：R6=_____Ω、R7=_____Ω。

3-1.計算下列各列式之數值。

$$(1). f = 100\text{Hz}, A_{vco}(A_{vo} \neq \infty) = \frac{-R7/R6}{1 + 1/\beta A_{vo}} = \underline{\hspace{2cm}}。$$

$$(2). f = 1\text{KHz}, A_{vco}(A_{vo} \neq \infty) = \frac{-R7/R6}{1 + 1/\beta A_{vo}} = \underline{\hspace{2cm}}。$$

$$(3). f = 10 \text{ KHz} , A_{vco} (A_{vo} \neq \infty) = \frac{-R7/R6}{1 + 1/\beta A_{vo}} = \underline{\hspace{2cm}}。$$

$$(4). f = 100 \text{ KHz} , A_{vco} (A_{vo} \neq \infty) = \frac{-R7/R6}{1 + 1/\beta A_{vo}} = \underline{\hspace{2cm}}。$$

$$(5). f = 1 \text{ MHz} , A_{vco} (A_{vo} \neq \infty) = \frac{-R7/R6}{1 + 1/\beta A_{vo}} = \underline{\hspace{2cm}}。$$

3-2.擷取下列各節點之波形，其中電壓值均測量峰-峰值。

(1).輸入波形(示波器中顯示)： $V1=0.1(Vp-p)$ (以下皆同)，輸入頻率=100Hz。

◎測試節點[V1，VO22]： $V1=\underline{\hspace{1cm}} Vp-p$ ， $VO22=\underline{\hspace{1cm}} Vp-p$ ，電壓增益
= $\underline{\hspace{1cm}}$ 。測量相位差= $\underline{\hspace{1cm}}$ 度。

(2).輸入波形：V1(如前)，輸入頻率=1KHz。

◎測試節點[V1，VO22]： $V1=\underline{\hspace{1cm}} Vp-p$ ， $VO22=\underline{\hspace{1cm}} Vp-p$ ，電壓增益
= $\underline{\hspace{1cm}}$ 。測量相位差= $\underline{\hspace{1cm}}$ 度。

(3).輸入波形：V1(如前)，輸入頻率=10KHz。

◎測試節點[V1，VO22]： $V1=\underline{\hspace{1cm}} Vp-p$ ， $VO22=\underline{\hspace{1cm}} Vp-p$ ，電壓增益
= $\underline{\hspace{1cm}}$ 。測量相位差= $\underline{\hspace{1cm}}$ 度。

(4).輸入波形：V1(如前)，輸入頻率=100KHz。

◎測試節點[V1，VO22]： $V1=\underline{\hspace{1cm}} Vp-p$ ， $VO22=\underline{\hspace{1cm}} Vp-p$ ，電壓增益
= $\underline{\hspace{1cm}}$ 。測量相位差= $\underline{\hspace{1cm}}$ 度。

(5).輸入波形：V1(如前)，輸入頻率=1MHz。

◎測試節點[V1，VO22]： $V1=\underline{\hspace{1cm}} Vp-p$ ， $VO22=\underline{\hspace{1cm}} Vp-p$ ，電壓增益
= $\underline{\hspace{1cm}}$ 。測量相位差= $\underline{\hspace{1cm}}$ 度。

3-3.請簡略說明，上述輸入頻率值與電壓增益值的波形關係。

表(8-4)：VO22 節點的電壓增益與頻率及關係

測試頻率值	VO22 節點 電壓增益 (計算值)	VO22 節點 電壓增益 (模擬值)	VO22 節點 電壓增益 (實測值)	測量相位差(度) (實測值)
100Hz				
1KHz				
10KHz				
100KHz				
1MHz				

4.非反相電壓和放大器電路(U5)：輸入正弦波訊號測試(電壓相加的概念)

a.訊號產生器設定輸入波形： $V_1=0.1(V_p-p)$ ，輸入頻率=依各組頻率值。

b.測量下列各節點波形，擷取其波形，使用示波器量測功能鍵，測量輸入、輸出峰-峰值及波形頻率值，並說明其波形的關係。

c.擷取下列波形：

(1).測試節點[V1，VO22]：測量電壓峰-峰值(V_{p-p})。

$V_1 = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ ， $VO_{22} = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ 。

(2).測試節點[VO55]：測量電壓峰-峰值(V_{p-p})。

$VO_{55} = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ 。

(3).寫出電壓和關係式：

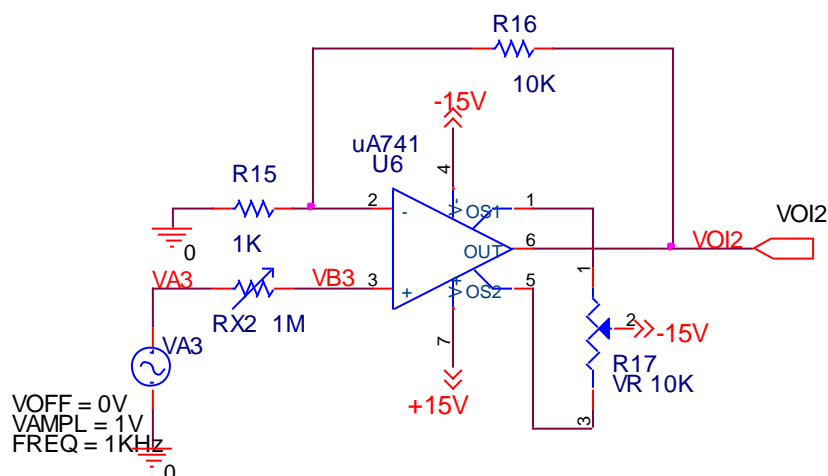
(4).請簡略說明，上述輸入波形與輸出波形的電壓關係。

[叁]、測試電路(三)：非反相電壓放大器電路輸入阻抗測量

1. VA3為峰值(AMPL)1Volt，1KHz之交流電壓(F.G.設定螢幕上)，峰對峰值為2 Volt(示波器設定螢幕上)。

2.調整RX2，使得 $VB3 = \frac{1}{2} VA3$ 。RX2移開，測量其電阻值= RX2，計算輸入阻抗。若VB3無法降至1 V或是雜訊過大，可調整出適當波形，仍可按照前(8-30)、(8-31)公式來計算 R_{in} (測量值)。

3.擷取波形：節點[VA3，VB3]波形，測量 $VA3 = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ 、 $VB3 = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ 。

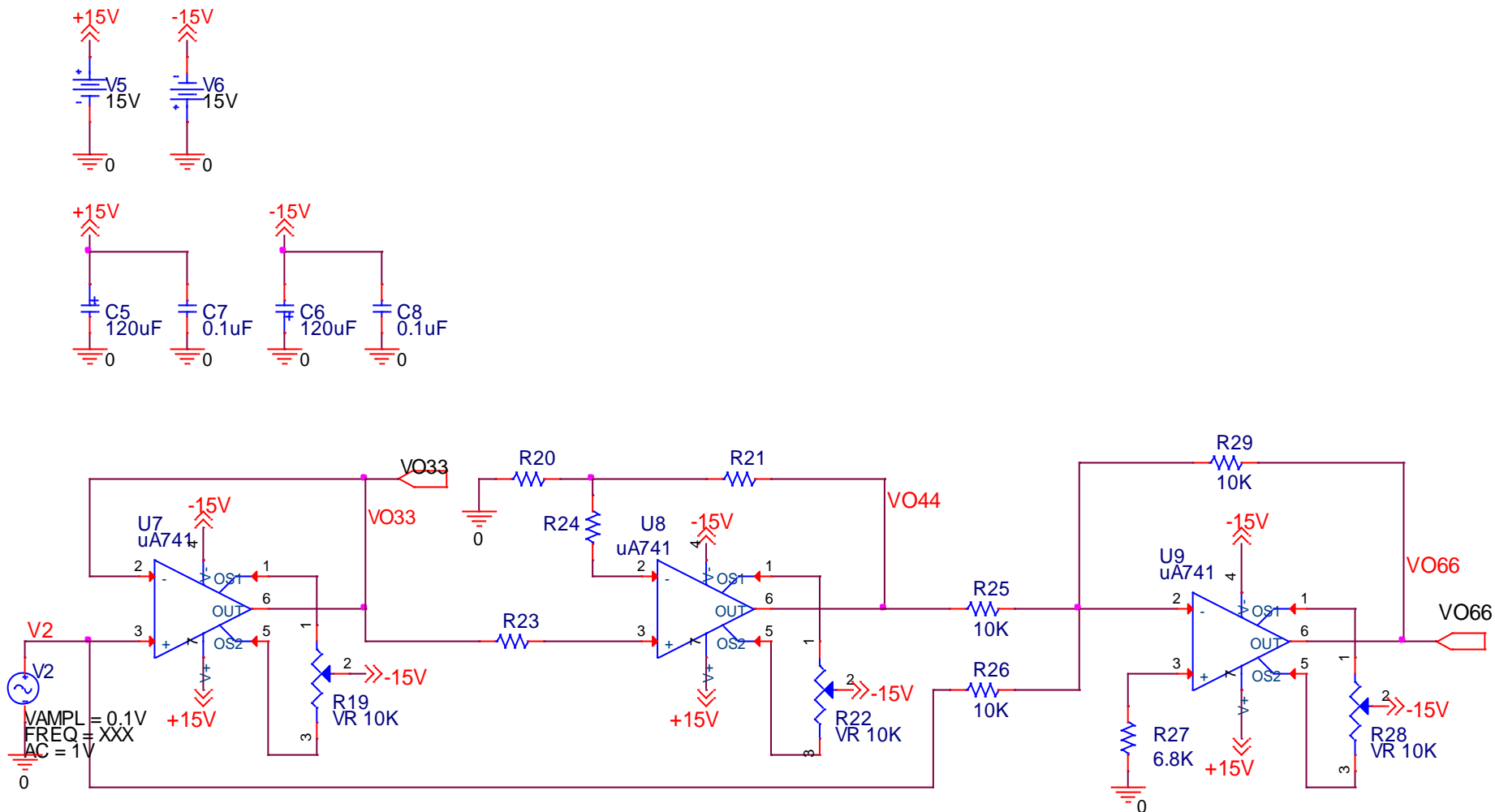


圖(8-3)：非反相電壓放大器電路輸入阻抗測試圖

表格(8-5)：反相放大器電路輸入阻抗

R16	R17	VA3(Vp-p)	VB3(Vp-p)	RX2	R_{in} (測量值)	R_{in} (理論值)
1K Ω	10K Ω					$\infty \Omega$

[肆]、測試電路(四)：非反相電壓放大器與反相電壓和放大器測試電路圖



圖(8-4)：非反相電壓放大器與反相電壓和放大器測試電路圖

1.實驗電路設計：參閱圖(8-4)電路圖，自行設計 U8 運算放大器電路中 R20、R21、R23 及 R24 等電阻值。需列出計算式，繳交上課筆記，列入實驗檢查項目。

a.設計規格：依據表格(三)內容求出電阻值。

b.參考所附的設計程序資料，計算出最佳的回授電阻 R21，需將下列數值代入(8-40)計算公式中，列出計算式，不能直接寫出數值 R21(未列計算式扣分)。[6]

$$R21(opt) = \sqrt{\left(\frac{R_{id}R_o}{2}\right) \times \left(\frac{R21}{R20}\right)} = \sqrt{\left(\frac{R_{id}R_o}{2}\right) \times (A_{vc} - 1)} \quad (8-40)$$

其中

(1). R_{id} ：運算放大器的差動輸入電阻($2M\Omega, +25^\circ C$)，選用 $R_{id}=2M\Omega$ 。

(2). R_o ：運算放大器的輸出電阻($75\Omega, +25^\circ C$)，選用 $R_o=75\Omega$ 。

(3). A_{vc} ：理想運算放大器參數閉迴路電壓增益，參閱表格(三)各組設定值。

$$A_{vc} = 1 + \frac{R21}{R20}, \quad \frac{R21}{R20} = (A_{vc} - 1) \quad (8-41)$$

R20 所需要的大小為(8-42)式，代入 $R21(opt)$ ，計算出 R20。

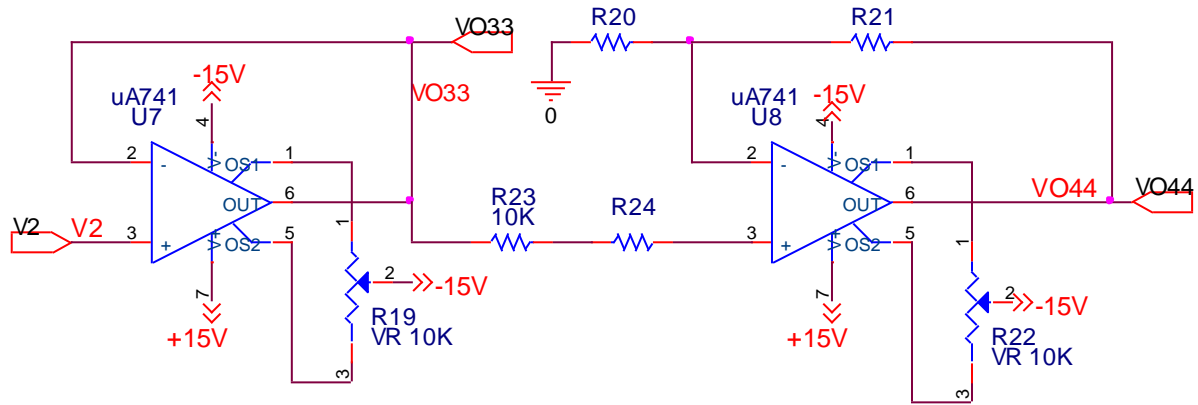
$$R20 = \frac{R21(opt)}{(A_{vc} - 1)} \quad (8-42)$$

c.欲使得由 I_b 所致的輸出抵補電壓為最少所需使用 R24 最佳值，參閱(8-43)式，代入上述各項電阻值，計算出 R24。

$$R24 = R23 - \frac{R20 \times R21}{R20 + R21} \quad (8-43)$$

若上式(8-43)為負值時，則將 R24 與非反相輸入串接，如圖(8-5)所示，且令(8-43)式改為(8-44) 式。

$$R24 = \frac{R20 \times R21}{R20 + R21} - R23 \quad (8-44)$$



圖(8-5)：前實驗測試電路之修正圖


2. 運算放大器電路輸出直流位準偏移量之計算與歸零調整

a. 直流位準偏移量(理論值)：其中參閱下列 IC Data Sheet 各項數值，代入(8-45)式，計算出 E_{O2} 值。[7]

$$E_{O2} = \left(1 + \frac{R21}{R20}\right) \times \Delta V_{io} + \Delta I_{io} \times R21 \quad \text{單位：V} \quad (8-45)$$

(1). $\Delta I_{io} = \pm 0.5 \text{ nA}/^{\circ}\text{C}$ 最大值。

(2). $\Delta V_{io} = \pm 15 \text{ uV}/^{\circ}\text{C}$ 最大值。

b. 參閱圖(8-4)電路圖，IC 要接電源接上 $\text{DC} \pm 15\text{V}$ 。節點[V2]接地 ，節點[V2]直接接地=輸入 0V。

c. 示波器設定：輸入通道採用直流耦合，適當調整示波器的垂直刻度(要觀測 mV)，使用電壓測量功能鍵，測量 V_{max} 。

d. 直流位準偏移量之調整(4)：

①. 調整可變電阻 R19，觀測節點[VO33]直流電壓變化情形，是 ☐、否 ☐ 為 mV 值，其電壓範圍是 ☐、否 ☐ 由 $[-\text{○○mV} \sim +\text{○○mV}]$ 的變化情形。

②. 測量節點[VO33]電壓，記錄最低及最高電壓變化範圍值，見表格(8-6)內容，並同

時擷取節點[VO33]波形。

- ③.歸零調整:調整可變電阻 R19,然後將節點[VO33]的電壓調整到節點[VO33] \cong 0V,

歸零調整後,再次擷取輸出節點[VO33]波形。

e.直流位準偏移量之調整(5):

- ①.調整可變電阻 R22,觀測節點[VO44]直流電壓變化情形,是□、否□為 mV 值,

其電壓範圍是□、否□由[-○○mV~+○○mV]的變化情形。

- ②.測量節點[VO44]電壓,記錄最低及最高電壓變化範圍值,見表格(8-6)內容,並同

時擷取節點[VO44]波形。

- ③.歸零調整:調整可變電阻 R22,然後將節點[VO44]的電壓調整到節點[VO44] \cong 0V,

歸零調整後,再次擷取輸出節點[VO44]波形。

f.直流位準偏移量之調整(6):

- ①.調整可變電阻 R28,觀測節點[VO66]直流電壓變化情形,是□、否□為 mV 值,

其電壓範圍是□、否□由[-○○mV~+○○mV]的變化情形。

- ②.測量節點[VO66]電壓,記錄最低及最高電壓變化範圍值,見表格(8-6)內容,並同

時擷取節點[VO66]波形。

- ③.歸零調整:調整可變電阻 R28,然後將節點[VO66]的電壓調整到節點[VO66] \cong 0V,

歸零調整後,再次擷取輸出節點[VO66]波形。

測量上述數據後,可以了解直流偏壓對於放大器的影響(輸出直流電壓的漂移現象)

及如何以何種方法來減少運算放大器的誤差。

表(8-6)：輸出直流位準偏移量之測試

調整可變電阻	測試節點	記錄電壓變化範圍 (最小值～最大值)
R19	節點[VO33]	～
R22	節點[VO44]	～
R28	節點[VO66]	～

3.輸入正弦波訊號測試電壓增益計算與測量

a.依電路原理預測各級電壓增益值。

b.因為開環直流增益 A_{vo} 在 $+25^{\circ}\text{C}$ 時最壞的情況最小值為 2×10^5 ，所以實際的電壓增益為下列所示：[6] 將數值代入下列計算式中，計算迴路增益(需附上計算列式)，附於實驗電路模擬報告中。

$$A_{vco}(A_{vo} \neq \infty) = \frac{1 + R21/R20}{1 + 1/\beta A_{vo}} \quad (8-46)$$

其中 β ：R20 與 R21 所構成的電壓回授比(β)，參閱表格(三)各組設定值，代入 A_{vc} 值，計算出 β 值。

$$\beta = \frac{R20}{R20 + R21} = \frac{1}{A_{vc}} \quad (8-47)$$

c.參閱圖(三)：Data Sheet 的 Open Loop Gain & Frequency 關係圖可以知道其開環迴路直流增益與頻率的相對應值，見表格(8-3)，接著依據表格(8-8)內容，需先行實際測量電阻 R20 及 R21，再將各項數值代入(8-46)式中，計算出各頻率下的閉迴路電壓增益值。

如前表(8-3)：開環迴路直流增益與頻率的相對應值[6]

參數	直流	10Hz	100Hz	1KHz	10KHz	100KHz	1MHz
A_{vo} (理論值)	2×10^5	6.3×10^4	8000	800	80	8	1

d. 測量值電阻：R20=_____Ω、R21=_____Ω。

3-1. 計算下列各列式之數值。

$$(1). f = 100 \text{ Hz} , A_{vco}(A_{vo} \neq 0) = \frac{1 + R_{21}/R_{20}}{1 + 1/\beta A_{vo}} = \underline{\hspace{2cm}}。$$

$$(2). f = 1 \text{ KHz} , A_{vco}(A_{vo} \neq 0) = \frac{1 + R_{21}/R_{20}}{1 + 1/\beta A_{vo}} = \underline{\hspace{2cm}}。$$

$$(3). f = 10 \text{ KHz} , A_{vco}(A_{vo} \neq 0) = \frac{1 + R_{21}/R_{20}}{1 + 1/\beta A_{vo}} = \underline{\hspace{2cm}}。$$

$$(4). f = 100 \text{ KHz} , A_{vco}(A_{vo} \neq 0) = \frac{1 + R_{21}/R_{20}}{1 + 1/\beta A_{vo}} = \underline{\hspace{2cm}}。$$

$$(5). f = 1 \text{ MHz} , A_{vco}(A_{vo} \neq 0) = \frac{1 + R_{21}/R_{20}}{1 + 1/\beta A_{vo}} = \underline{\hspace{2cm}}。$$

3-2.擷取下列各節點之波形，其中電壓值均測量峰-峰值(V_{p-p})。

(1). 輸入波形(示波器中顯示)： $V_1 = 0.1(V_{p-p})$ (以下皆同)，輸入頻率=100Hz。

◎測試節點[V2, VO44]： $V_2 = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ ， $VO_{44} = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ ，電壓增益 = $\underline{\hspace{2cm}}$ ，
測量相位差 = $\underline{\hspace{2cm}}$ 度。

(2).輸入波形： V_2 (如前)，輸入頻率=1KHz。

◎測試節點[V2, VO44]： $V_2 = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ ， $VO_{44} = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ ，電壓增益 = $\underline{\hspace{2cm}}$ 。測量相位差 = $\underline{\hspace{2cm}}$ 度。

(3).輸入波形： $[V_2]$ (如前)，輸入頻率=10KHz。

◎測試節點[V2, VO44]： $V_2 = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ ， $VO_{44} = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ ，電壓增益 = $\underline{\hspace{2cm}}$ 。測量相位差 = $\underline{\hspace{2cm}}$ 度。

(4).輸入波形： $[V_2]$ (如前)，輸入頻率=100KHz。

◎測試節點[V2, VO44]： $V_2 = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ ， $VO_{44} = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ ，電壓增益 = $\underline{\hspace{2cm}}$ 。測量相位差 = $\underline{\hspace{2cm}}$ 度。

(5).輸入波形： $[V_2]$ (如前)，輸入頻率=1MHz。

◎測試節點[V2, VO44]： $V_2 = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ ， $VO_{44} = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ ，電壓增益 = $\underline{\hspace{2cm}}$ 。測量相位差 = $\underline{\hspace{2cm}}$ 度。

3-3.請簡略說明，上述輸入頻率值與電壓增益值的波形關係。

表(8-7)：節點[VO44]的電壓增益、相位差與頻率關係

測試頻率值	節點[VO44] 電壓增益 (計算值)	節點[VO44] 電壓增益 (模擬值)	節點[VO44] 電壓增益 (實測值)	測量相位差(度) (實測值)
100Hz				

測試頻率值	節點[VO44] 電壓增益 (計算值)	節點[VO44] 電壓增益 (模擬值)	節點[VO44] 電壓增益 (實測值)	測量相位差(度) (實測值)
1KHz				
10KHz				
100KHz				
1MHz				

4.反相電壓和放大器電路(U9)：輸入正弦波訊號測試(電壓相加的概念)

a.訊號產生器設定輸入波形： $V_2 = 0.2(V_p - p)$ ，輸入頻率=依各組頻率值。

b.測量下列各節點波形，擷取其波形，使用示波器量測功能鍵，測量輸入、輸出峰-峰值及波形頻率值，並說明其波形的關係。

c.擷取下列波形：

(1).測試節點[V2，VO44]：測量電壓峰-峰值(V_{p-p})。

$V_2 = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ ， $VO44 = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ 。

(2).測試節點[VO66]：測量電壓峰-峰值(V_{p-p})。

$VO66 = \underline{\hspace{2cm}} V_{p-p}$ 。

(3).寫出電壓和關係式：

(4).請簡略說明，上述輸入波形與輸出波形的電壓關係。

八、實驗問題與討論

- 參閱實驗設計值、測量值，請分析實驗數據與實驗波形，試列出你所了解那些運算放大器電路的理想特性與實際電路特性。

九、實驗結論與實驗心得

十、實驗綜合評論

- 1.實驗測試說明、實驗補充資料及老師上課原理說明，是否有需要改善之處。
- 2.實驗模擬項目內容，是否有助於個人對實驗電路測試內容的了解。
- 3.實驗測量結果，是否合乎實驗目標及個人的是否清楚瞭解其電路特性。
- 4.就實驗內容的安排，是否合乎相關課程進度。
- 5.就個人實驗進度安排及最後結果，自己的評等是幾分。
- 6.在實驗項目中，最容易的項目有那些，最艱難的項目包含那些項目，並回憶一下，您在此實驗中學到了那些知識與常識。

十一、附上實驗進度紀錄單(照片檔)及麵包板電路組裝圖檔(照片檔)

十二、實驗參考資料

[1].IC Data sheet uA741

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ua741.pdf>

[2]. SEDRA & SMITH ，“MICROELECTRONIC CIRCUITS”，Copyright by Oxford University Press,Inc, sixth edition 2010,P.84～P.129.

[3]. “電子元件與電路理論”，張順雄、張忠誠、李榮乾編譯，東華書局出版,第三版,1999,P.804～P.829,P.833～P.846.

[4].Sergio Franco ，“Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated

Circuits”，McGraw-Hill International Editions 1988,P.178～P.181,P.217～P.224.

[5].**運算放大器**

<http://zh.wikipedia.org/wiki/>

[6].**“運算放大器設計指南”**，莊政義編譯，東華書局出版,第二版,1991,P.122～P.138。

[7].Sergio Franco，**“Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated**

Circuits”，McGraw-Hill International Editions 1988,P.191～P.195.

[8].**心電圖**，維基百科(Electrocardiography):

<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%BF%83%E7%94%B5%E5%9B%BE>