

實驗單元(五)：文士電橋振盪器電路

一、實驗目的

1. 本實驗在於驗證 Barkhausen Criterion。
2. 了解如何使用 OP 運算放大器來產生弦波波形。

二、實驗儀器設備與實驗材料

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

表(二)：文士電橋振盪器電路實驗料表

項次	位 置 碼	元 件 說 明	用 量
1	C3、C6	0.0047uF PE 電容	2 個
2	C2、C5	0.1uF PE 電容(電源去耦合電容)	2 個
3	C1、C4	120uF 電解質電容	2 個
4	D1、D2	Zener Diode 2.7V	2 個
5	U1	OP AMP uA741CP	2 個
6	碳膜電阻與可變電阻	依實驗內容及設計值，選用適當電阻值	

三、實驗預習

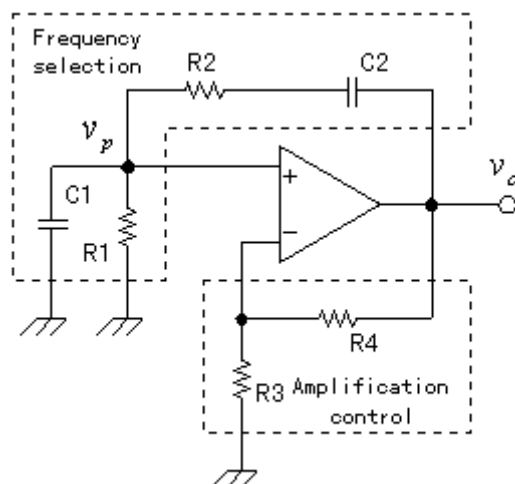
1. 參閱實驗電路圖，畫出完整文士電橋振盪器電路，寫出回授 β 網路的轉換方程式，寫出其振盪頻率公式，並依各組實驗要求的輸出頻率值，見表格 (5-1) 內容，此時給定電容值 $C5=C6=0.0047\mu\text{F}$ ，計算出所需要的電阻數值，選用 5%標準碳膜電阻值 $R5=R6=?\Omega$ ，選用可變電阻值 $R9=R10=?\Omega$ 。
2. 使用 OrCAD 軟體模擬出上述實驗電路圖，須說明回授電壓關係及相位特性，模擬結果在 FFT 轉換後，使用游標標示出振盪頻率值。

四、電路說明

如何產生弦波？在 Barkhausen Criterion 中描述產生弦波需滿足相位差或時間延遲 360 度且增益為 1 的條件才能穩定振盪，若增益過大會使弦波發散；反之則會收斂或無法振盪。在此介紹兩種弦波產生的電路：

1. 文士電橋振盪器(Wien Bridge Oscillator)

a. 振盪器電路



圖(一)：振盪器之組成元件

圖(一)是由運算放大器所組成的基本型式文士電橋振盪器電路，其中運算放大器的正回授電路，由 R1、R2、C1 及 C2 等 RC 元件所組成領先－落後網路，為振盪器的頻率選擇網路，負回授路徑由 R3 及 R4 所組成的非反相放大器增益控制，其電壓增益值 $= \left(1 + \frac{R4}{R3}\right)$ 。

b. 何謂電橋電路？

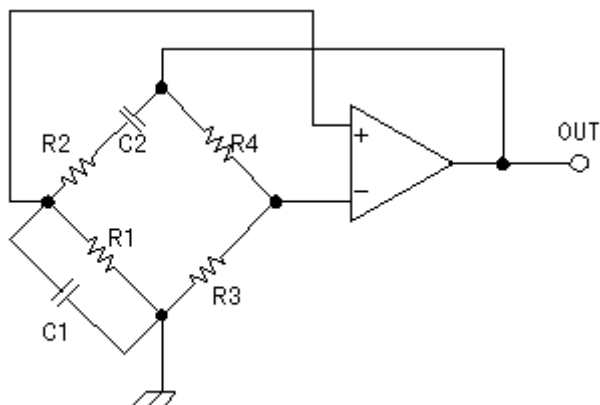
將圖(一)電路圖更改為圖(二)：電橋型式之電路，當電橋平衡時，為此振盪電路的震盪條件。

得到文士電橋振盪器頻率公式

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1 \times R2 \times C1 \times C2}}$$

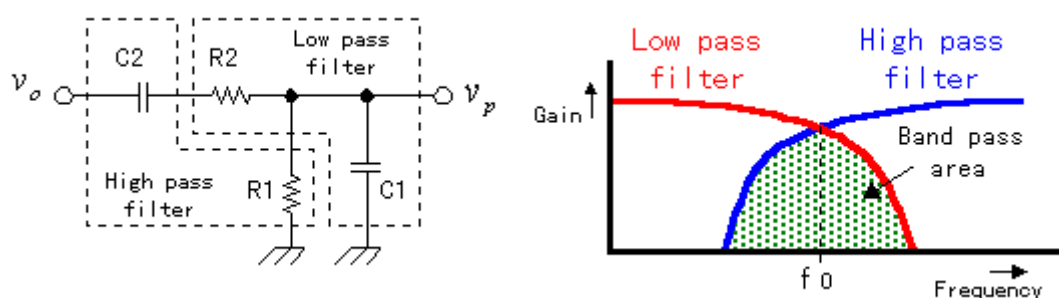
當 $C1=C2=C$ ， $R1=R2=R$ 時，上式振盪器頻率為 $f = \frac{1}{2\pi RC}$ 。

電路維持穩定輸出之條件為電壓增益 $=3=(1+R_4/R_3)$ 。



圖(二)：電橋電路

c. 頻率選擇電路



圖(三)：頻率選擇電路 v_p 與 v_o 關係

圖(三)所組成頻率選擇電路為領先－落後網路型式。 R_2 - C_1 為低通濾波電路，讓低頻訊號通過，訊號經 C_1 接地，高頻訊號衰減。 R_1 - C_2 為高通濾波電路，讓高頻訊號通過，低頻時容抗 X_{C_2} 為高阻抗，低頻訊號衰減。低頻時，容抗 X_{C_2} 高阻抗，電路特性由高通濾波電路所決定，當頻率增加時， X_{C_2} 阻抗值減少，使輸出電壓增高，當某特定頻率時，電路特性由低通濾波電路所決定，即頻率增加時， X_{C_1} 阻抗值減少，導致輸出電壓下降。組合上述兩電路，訊號通過兩重疊頻率區域，此電路稱為帶通濾波器。

d. 決定振盪條件與振盪頻率

參閱圖(一)計算回授量 $\beta = \frac{v_p}{v_o}$ 分壓比。

$$\text{串聯阻抗： } Z_s(j\omega) = R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} = \frac{1 + j\omega R_2 C_2}{j\omega C_2}$$

$$\text{並聯阻抗： } Z_p(j\omega) = R_1 // \frac{1}{j\omega C_1} = \frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1}$$

$$\beta(j\omega) = \frac{Z_p}{Z_p + Z_s} = \frac{v_p}{v_o} = \frac{\frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1}}{\frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} + \frac{1 + j\omega R_2 C_2}{j\omega C_2}} = \frac{1}{1 + \frac{(1 + j\omega R_1 C_1)(1 + j\omega R_2 C_2)}{j\omega R_1 C_2}}$$

$$\beta(j\omega) = \frac{1}{1 + \frac{\omega R_1 C_1 + \omega R_2 C_2}{\omega R_1 C_2} + \frac{1 - \omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2}{j\omega R_1 C_2}}$$

$$A\beta(j\omega) \geq 1, |A\beta(j\omega)| = 1, \angle(A\beta(j\omega)) = 0^\circ, A = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right), \beta(j\omega) \text{ 為實數。}$$

$$\text{即上述中若分母項目虛數}=0, \text{則 } |\beta(j\omega)| = \frac{1}{1 + \frac{\omega R_1 C_1 + \omega R_2 C_2}{\omega R_1 C_2}} = \frac{1}{1 + \frac{C_1}{C_2} + \frac{R_2}{R_1}}。$$

①. 當虛數=0，計算可得振盪頻率

$$1 - \omega_o^2 R_1 R_2 C_1 C_2 = 0, \omega_o = 2\pi f_o, f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}。$$

$$\text{②. 當電路振盪時，即 } |\beta(j\omega_o)| = \frac{1}{1 + \frac{\omega_o R_1 C_1 + \omega_o R_2 C_2}{\omega_o R_1 C_2}} = \frac{1}{1 + \frac{C_1}{C_2} + \frac{R_2}{R_1}}, \text{表示衰減}$$

量。

$$|A\beta(j\omega)| = 1, A = 1 + \frac{R_4}{R_3}, |A\beta(j\omega)| = \frac{\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)}{\left(1 + \frac{C_1}{C_2} + \frac{R_2}{R_1}\right)} = 1,$$

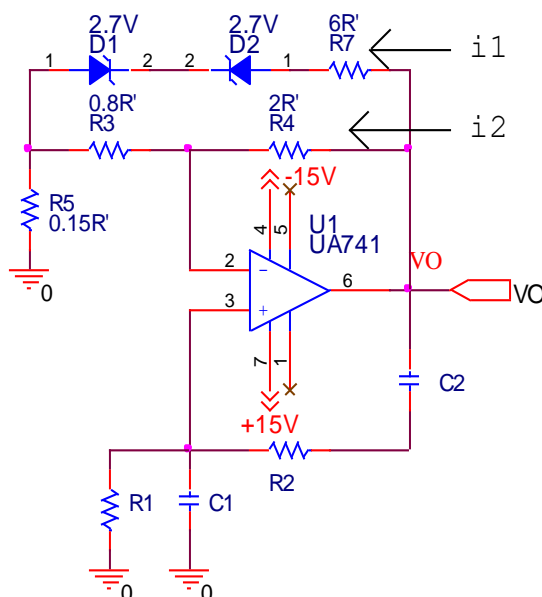
$$\text{即 } \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) = \left(1 + \frac{C_1}{C_2} + \frac{R_2}{R_1}\right)。$$

$$\text{③. 若 } R = R_1 = R_2, C = C_1 = C_2, \text{則 } \beta(j\omega_o) = \frac{1}{3}。$$

$$\text{振盪頻率公式： } f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} = \frac{1}{2\pi RC}。$$

選用元件：RC 串並聯電路的阻抗數 $K\Omega \sim$ 數百 $K\Omega$ 以下，即上式振盪頻率之公式選用 $R \approx 1K\Omega \sim 500K\Omega$ 之間的範圍，否則 OPAMP 的負載會加重，容易受雜訊電容量影響。

e. 自動振幅控制 AGC (Automatic Amplitude Control)



圖(四)：含波幅限制器的振盪器電路

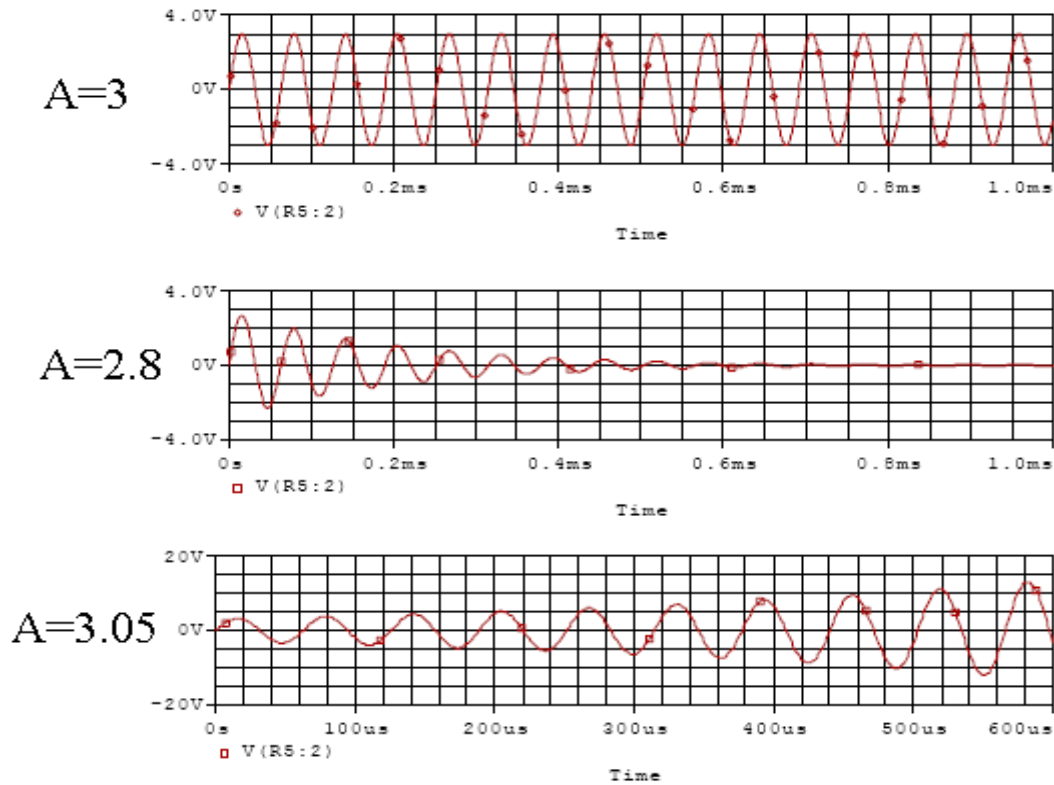
參閱圖(五)，在電路迴路中，電壓增益 A 的關係值如下說明：

- ①. 當 $A=3$ 時，振盪器產生振盪且持續振盪。
- ②. 當 $A>3$ 時，振盪器持續振盪且振幅逐漸增大，最後波形截止失真。
- ③. 當 $A<3$ 時，振盪器輸出振幅衰減，最後無法產生振盪。

為達到穩定的振幅輸出使用波幅限制器，如圖(四)所示。Zener Diode 在振盪器的增益自動控制，可穩定弦波的振幅。

當兩個 Zener Diode 都不導通時，此時迴路增益為

$$\frac{1}{3} \times \left(1 + \frac{R4}{R3 + R5} \right) = \frac{1}{3} \times \left(1 + \frac{2R'}{0.15R' + 0.8R'} \right) = 1.04 > 1$$



圖(五)：電壓增益電路對振盪器的影響

因此開始振盪。由於迴路增益大於 1，所以振盪器振幅會增加直到峯值超過二極體的崩潰電壓 V_z ，D1 及 D2 導通，此時電阻器 R7 的並聯作用降低了增益並將振幅限制在 V_z 左右，以維持穩定的波幅。

當 D1 及 D2 導通時，反相端輸入電壓(V_-)為

$$(V_-) = i_2 \times R3 + (i_1 + i_2) \times R5$$

i_1 為流過 R7 之交流電流， i_2 為流過 R4 之交流電流，交流分析時，二極體的直流壓降視為短路。

$$i_1 \times R7 = i_2 \times (R3 + R4) \Rightarrow i_1 = i_2 \times \left(\frac{R3 + R4}{R7} \right)$$

$$VO = i_2 \times R4 + (V_-) = i_2 \times R4 + i_2 \times R3 + (i_1 + i_2) \times R5$$

$$VO = i_2 \times (R3 + R4 + R5) + i_2 \times \frac{R3 + R4}{R7} \times R5 = i_2 \times \left(R3 + R4 + R5 + \frac{(R3 + R4) \times R5}{R7} \right)$$

$$\Rightarrow (V_-) = i_2 \times (R3 + R5) + i_2 \times \frac{R3 + R4}{R7} \times R5 = i_2 \times \left(R3 + R5 + \frac{(R3 + R4) \times R5}{R7} \right) \text{ 將 } R3$$

$= 0.8R'$ ， $R5 = 0.15R'$ ， $R4 = 2R'$ ， $R7 = 6R'$ 等值代入上兩式，可得

$$\frac{V_O}{V_-} = \frac{0.8R' + 2R' + 0.15R' + \frac{(0.8R' + 2R') \times 0.15R'}{6R'}}{0.8R' + 0.15R' + \frac{(0.8R' + 2R') \times 0.15R'}{6R'}} = \frac{3.02}{1.02} = 2.96 < 3$$

若取 $R_7 = R'$ ，則 $\frac{V_O}{V_-} = 2.46 < 3$ 。

當 $R_7 = 6R'$ 時， $\frac{V_O}{V_-} = 2.96$ 與 $R_7 = R'$ ，則 $\frac{V_O}{V_-} = 2.46$ ，表示不同的電壓衰

減率。在 $R_7 = 6R'$ 時，增益下降有限，導致振幅衰減速度太慢，如此可導致振盪器快速達到飽和狀態。若在 R_7 取得過小時，振幅衰減過快，將導致振盪器

輸出波形嚴重失真。若取 $R_7 = 2R'$ 時，則 $\frac{V_O}{V_-} = 2.72 < 3$ ，此值應可以使用。

當二極體導通時， $V_O = V_{O1}$ 。

$$i_2 \times (R_3 + R_4) = V_Z + V_D = \frac{V_{O1}}{R_3 + R_4 + R_5} \times (R_3 + R_4)$$

$$V_{O1} = \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_3 + R_4} \times (V_Z + V_D) = \frac{0.8R' + 2R' + 0.15R'}{0.8R' + 2R'} \times (V_Z + V_D)$$

$$V_{O1} = 1.05 \times (2.7 + 1.0) = 3.89(V) \text{ (二極體 1N4618)}$$

$$V_{O1} = 1.05 \times (2.4 + 1.0) = 3.57(V) \text{ (二極體 1N4617)}$$

參閱 Data Sheet：二極體 1N4618， $V_Z = 2.7V$ ， $V_D = 1.0V$ 。

參閱 Data Sheet：二極體 1N4617， $V_Z = 2.4V$ ， $V_D = 1.0V$ 。

若取 $R' = 6K\Omega$ ，即

$R_3 = 0.8R' = 4.8K\Omega$ ，選用 $R_3 = 4.7K\Omega$ 。

$R_4 = 2R' = 12K\Omega$ ，選用 $R_4 = 12K\Omega$ 。

$R_5 = 0.15R' = 0.9K\Omega$ ，選用 $R_5 = 1K\Omega$ 。

$R_7 = 2R' = 12K\Omega$ ，選用 $R_7 = 12K\Omega$ 。

f. 電路模擬

電路模擬元件與模擬設定值如下所示：

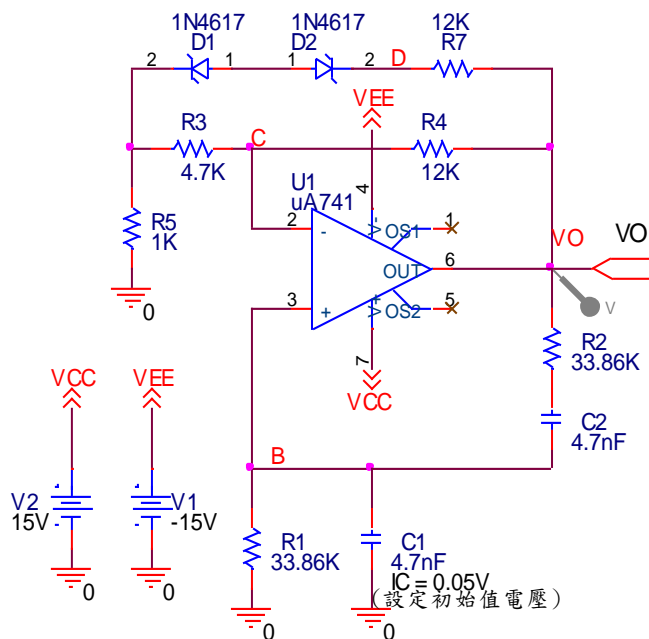
①. Zener Diode 模擬元件選用 1N4617 ($V_Z = 2.4V$)。

②. 電容 C2 需設定初使值電壓 = 0.05V 以加速振盪器起振能力。

③. 振盪頻率值 = 1KHz。

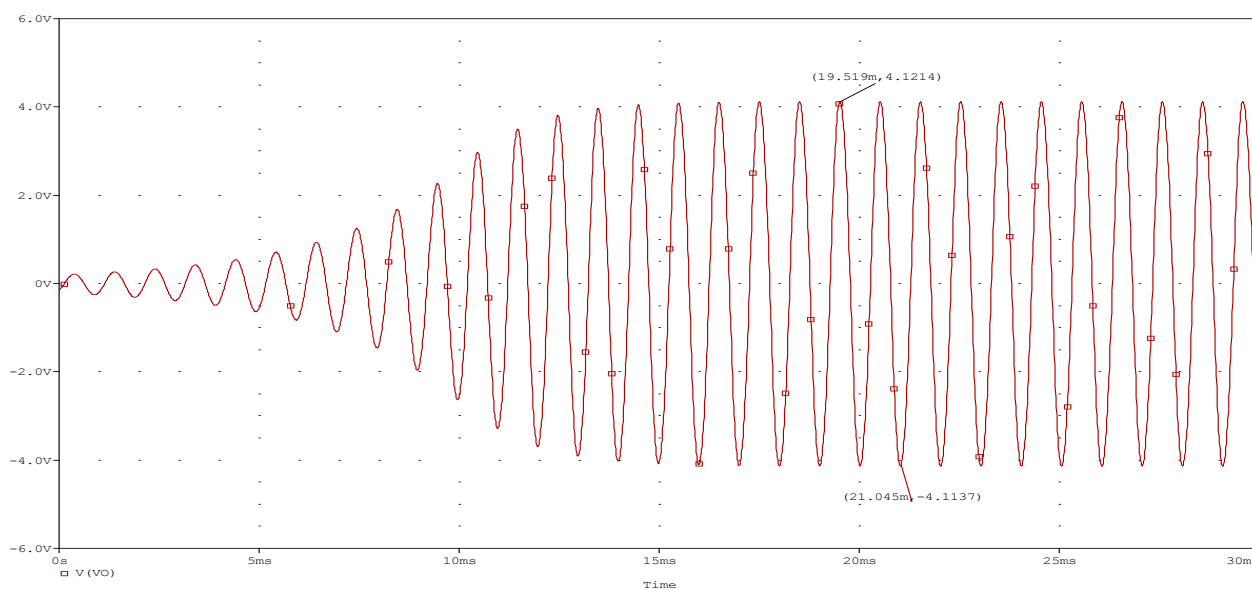
④. 選用元件 $C1 = C2 = C = 4.7\text{nF}$ (電容 472)

$$\text{計算電阻 } R1 = R2 = \frac{1}{2\pi \times C \times f_o} = \frac{1}{2\pi \times 4.7 \times 10^{-9} \times 10^3} = 33.862\text{K}\Omega$$

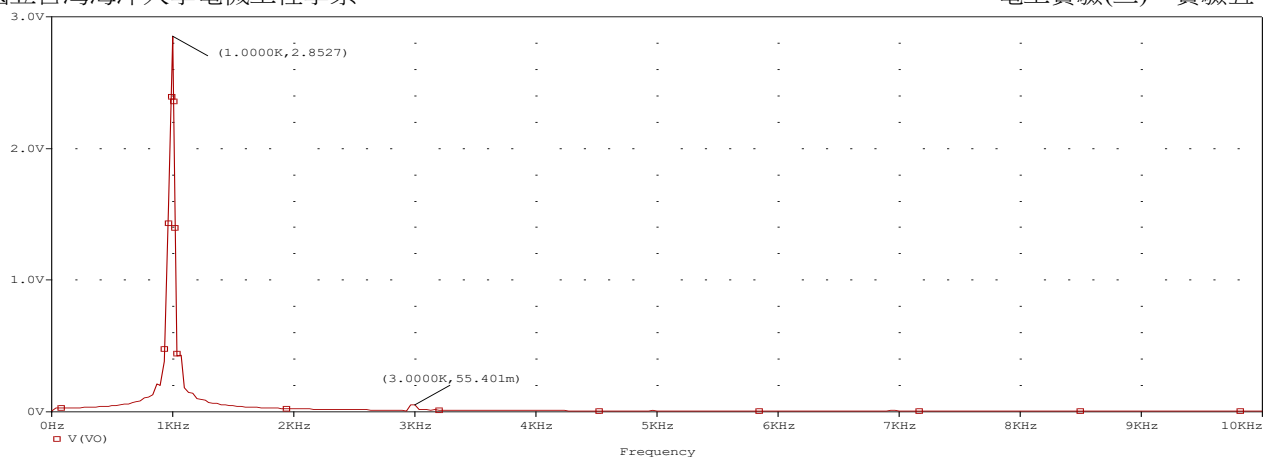


圖(六)：Wien-bridge 振盪器模擬電路圖

■ Wien-bridge 振盪器電路模擬結果



圖(七)：Wien-bridge 振盪器模擬結果(time-domain)



圖(八)：Wien-bridge 振盪器模擬結果(FFT)

表(三)：實驗組別與振盪頻率對照表

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

五、實驗注意事項與電路模擬

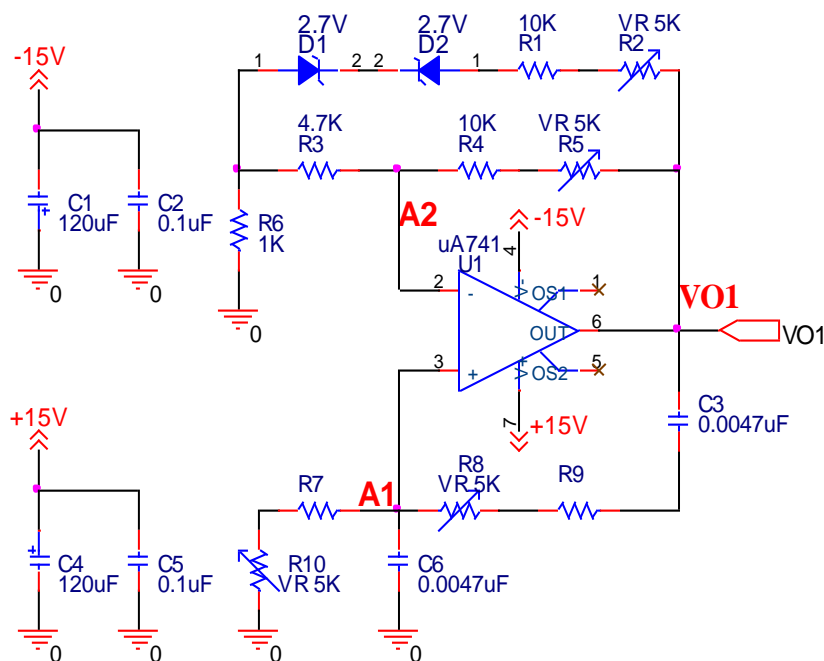
1. 使用萬用電錶之注意事項：測量電壓時，請設定為4位半顯示測量值。測量電阻時，請設定為4位半顯示測量值。
2. 各組別的頻率要求值如表格(三)所示，請在實驗預報中計算所需要電阻值，並使用模擬軟體，模擬出實驗振盪值。
3. 實驗步驟中的頻率值＝規定之頻率值，即為各組所規定的頻率值。
4. 下列各實驗步驟所需擷取之輸出波形圖，應使用示波器的測量功能，測量出頻率值及振幅大小(V_{p-p})，若未顯示上述之測量結果，則需重新擷取波形。

六、實驗項目與實驗步驟

■實驗實作電路：Wien 電橋振盪器

1. **實驗設計與電路模擬**：依據實驗振盪公式及各組別的頻率要求，見表格(三)內容，給定電容值，計算出電阻值 R7 及 R9，選用電阻元件，計算 $\tau = RC$ 值，完成實驗模擬。

◎計算列式：繳交實驗預習上課筆記。



圖(5-1)：實驗電路圖(1)

※R7=R8，選用 VR 1K Ω 或是 VR 2K Ω 。

※R5 選用 VR 10K Ω ，R4 選用 15K Ω 。※R2 選用 VR 5K Ω

2. 接好圖(5-1)：實驗電路圖(1)，其中 D1、D2、R1 及 R2 等元件暫且不要接。
3. 接上雙電源 $\pm 15V$ 。以示波器觀測節點[VO1]訊號，適當調整可變電阻(R8 及 R10)一可改變頻率值及振幅大小，適當調整可變電阻(R5)一可改變非反相放大器的電壓增益值。在調整的過程中，您會發現由於控制太靈敏以致於非常難以控制輸出振幅大小，這是因為調整三顆可變電阻均可改變輸出振幅大小。請調整出任一振盪波形出來(失真波形也可以)，然後記錄其頻率值及電壓(V_{P-P})，完成表格(5-1)內容，擷取各節點波形。
4. 擷取下列各實驗測量波形：(實驗步驟 3.)
- 節點[VO1]波形
 - 節點[VO1、A1] 波形
 - 節點[VO1、A2] 波形
 - 節點[A1，A2] 波形

表(5-1)：測量數據與測量波形(實驗步驟 3.)

各相對節點	觀 測 結 果
節點[VO1]	①.輸出振盪頻率=_____Hz。 ②.波形峰-峰值(V_{P-P})=_____。
節點[A1]	①.輸出振盪頻率=_____Hz。 ②.波形峰-峰值(V_{P-P})=_____。
節點[A2]	①.輸出振盪頻率=_____Hz。 ②.波形峰-峰值(V_{P-P})=_____。

5. 為了可以得到穩定的輸出振幅，將波幅限制器電路加入上述電路中，接好 D1、D2、R1 及 R2 等元件。
6. 分別調整可變電阻 R8、R10、R5 及 R2，以示波器觀測節點[VO1]訊號，輸出應為最大且無失真弦波波形，且振盪頻率值需依各組別之頻率。
7. 測量下列節點波形，擷取下列表格(5-2)中各節點的波形。使用示波器測量各相對節點波形，需顯示相角差及峰-峰值(V_{P-P})，並完成表格(5-2)內容。
8. 擷取下列各實驗測量波形：(實驗步驟 7.)
- 節點[VO1] 波形

b.節點[VO1、A1] 波形

c.節點[VO1、A2] 波形

d.節點[A1、A2] 波形

表(5-2)：測量數據與測量波形(實驗步驟 7.)

各相對節點	觀 測 結 果
節點[VO1]	①.輸出振盪頻率=_____Hz。
節點[VO1, A1]	①.節點[VO1]波形峰-峰值(V_{p-p})=_____。 ②.節點[A1]波形峰-峰值(V_{p-p})=_____。 ③.電壓比率= $\frac{VO1}{VA1}$ =_____。 ④.測量相角差 $\Delta\theta$ =_____。
節點[VO1, A2]	①.節點[VO1]波形峰-峰值(V_{p-p})=_____。 ②.節點[A2]波形峰-峰值(V_{p-p})=_____。 ③.電壓比率= $\frac{VO1}{VA2}$ =_____。 ④.測量相角差 $\Delta\theta$ =_____。
節點[A1, A2]	①.節點[A1]波形峰-峰值(V_{p-p})=_____。 ②.節點[A2]波形峰-峰值(V_{p-p})=_____。 ③.電壓比率= $\frac{VA2}{VA1}$ =_____。 ④.測量相角差 $\Delta\theta$ =_____。

9. 室溫下穩定度測試，了解溫度對振盪電路影響。測試節點[VO1]，將電路置於實驗桌面，記錄振盪頻率值且擷取實驗波形，記錄測試時間，經 30 分鐘後，再次記錄振盪頻率值且擷取實驗波形，完成表格(5-3)內容。

a.擷取節點[VO1] 波形(測試前頻率值)。

b.擷取節點[VO1] 波形(30 分鐘後)。

表(5-3)：溫度測試(實驗步驟 9.)

	頻 率 值	測 試 時 間
測試前頻率值		年 月 日 時 分
溫度測試(30 分鐘) 測試後頻率值		年 月 日 時 分

10. **先行實驗電路檢查**：此時您應該找助教檢查上述振盪電路，CH1 接節點[A1]，CH2 接節點[A2]，調整好頻率值，輸出波形不可失真，測量頻率值及峰-峰值(Vp-p)。

a. 擷取節點[A1，A2]波形圖：記錄頻率值=_____、測量節點[A1]峰-峰值(Vp-p)=_____、測量節點[A2]峰-峰值(Vp-p)=_____。

11. **更改電容的影響**：拆除 C5 及 C6，組裝 C5X=C6X=0.001uF，調整可變電阻，使用示波器觀察及擷取節點[VO1]波形，記錄頻率範圍值及波形變化情形。就更改電容的影響，試比較前後輸出波形的差異性，請分析其結果。

a. 節點[VO1]波形：記錄最大頻率值=_____。

測量節點[VO1]峰-峰值(Vp-p)=_____。

b. 節點[VO1]波形：記錄最小頻率值=_____。

測量節點[VO1]峰-峰值(Vp-p)=_____。

七、實驗問題與討論

1. 就步驟[3](不含 D1、D2)的實驗結果，請說明節點[VO1]間波形變化之情形及相關性。

2. 就步驟[7] (含 D1、D2)的實驗結果，請說明節點[VO1]間波形變化之情形及相關性。

3. 就步驟[9]室溫下穩定度測試的實驗結果，請您分析一下，頻率漂移之情形與電路元件之關係。

4. 就步驟[11]更改電容的影響的實驗結果，試比較節點[VO1]波形測試前、後輸出波形的差異性，請分析其結果。
5. 就上述實驗結果，請說明文士電橋振盪器最適當的工作頻率範圍。

八、撰寫實驗結論與心得

九、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、附上實驗進度紀錄單(照片檔)及麵包板電路圖組裝圖檔(照片檔)

十一、參考資料來源

- [1]. SEDRA & SMITH， “MICROELECTRONIC CIRCUITS”， Copyright by Oxford University Press, Inc, sixth edition 2010, P.1040～P.1048.
- [2]. “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.1012～P.1014.
- [3]. Sergio Franco， “Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits”， McGraw-Hill International Editions 1988, P.354～P.361.