

實驗單元(六)：方波產生器電路

一、實驗目的

1. 了解 OP 運算放大器在比較器的應用。
2. 了解如何使用 OP 運算放大器來產生方波波形。
3. 使用 OrCAD 軟體模擬 OPAMP 主動元件用於波形產生器之特性。

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)：方波產生器實驗料表

項次	位 置 碼	元 件 說 明	用量
1	C5 更換值	0.001uF PE 電容	1 個
2	C5	0.047uF PE 電容	1 個
3	電源去耦合電容	0.1uF PE 電容	2 個
4	電源去耦合電容	120uF	1 個
5	U1、U2	OP AMP uA741CP	2 個
6	D1、D2	Zener Diode 2.7V	2 個
7	R2	VR 5K Ω	1 個
8	碳膜電阻	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，畫出完整方波產生器電路，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(三)內容，此時給定電容值 $C5=0.047\mu\text{F}$ ，計算出所需要的電阻數值，然後選用 5%標準碳膜電阻值 $R1=?\Omega$ ，選用可變電阻值 $R2=?\Omega$ 。◎繳交上課筆記。
2. 使用 OrCAD 軟體模擬出上述實驗電路圖，須說明回授電壓與電容充、放電之關係，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

1.複振器(multivibrator)[1]

複振器是一種用來產生在兩種狀態間變化的系統的電子電路，譬如說振盪器、計數器、flip-flop等等。最常見的形式是用來產生方波的非穩態振盪器。

複振器大致上可以分成 3 種：

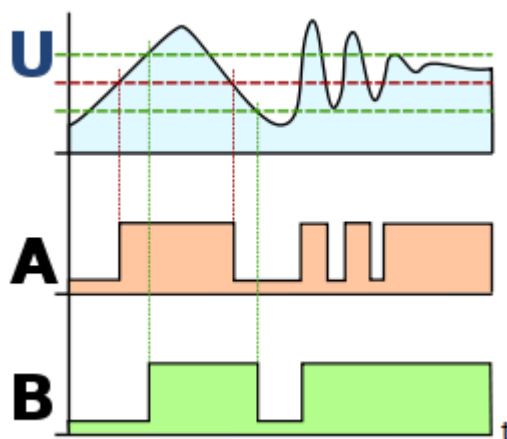
- 1-1.非穩態複振器 (astable multivibrator)，這種電路不管在哪一種狀態中都不是穩定的；它持續的由一種狀態轉變到另一種狀態，這種複振器又被稱為弛張振盪器。
- 1-2.單穩態複振器 (monostable multivibrator)，它所處的兩種狀態中有一種是穩態。這種電路會在外部訊號觸發時落入非穩態，但是在非穩態持續一段時間後還是會回到穩態。這種電路適用於對外部事件產生持續固定長度的訊號，也有人稱這一類的電路叫單穩態正反器 (One Shot) 電路，常見於用來除去 Switch Bounce 的現象。
- 1-3.雙穩態複振器 (bistable multivibrator)，這種電路的兩種狀態都是穩態。如果沒有特定訊號觸發的話，它會一直處在其中一種狀態。若有特定訊號觸發，此電路可以由一種狀態轉變到另一種狀態。它可以在建立基礎的記憶元件，如電腦中的記憶體或是中央處理器內部的暫存器。此電路也被稱為正反器或門鎖。有一種類似的電路是施密特觸發器。

2.施密特觸發器[2]

在電子學中，施密特觸發器 (Schmitt trigger) 是包含正回授的比較器電路。

對於標準施密特觸發器，當輸入電壓高於順向閾值電壓，輸出為高；當輸入電壓低於負向閾值電壓，輸出為低；當輸入在正負向閾值電壓之間，輸出不改變，也就是說輸出由高電平翻轉為低電平，或是由低電平翻轉為高電平對應的閾值電壓是不同的。只有當輸入電壓發生足夠的變化時，輸出才會變化，因此將這種元件命名為觸發器。這種雙閾值動作被稱為遲滯現象，表明施密特觸發器有記憶性。從本質上來說，施密特觸發器是一種雙穩態複振器。

施密特觸發器可作為波形整形電路，能將類比訊號波形整形為數位電路能夠處理的方波波形，而且由於施密特觸發器具有滯回特性，所以可用於抗干擾，其應用包括在開環配置中用於抗擾，以及在閉環正回饋配置中用於實作複振器。



圖(一)：施密特觸發器(B)與比較器(A)之作用[1]

2-1.反相施密特觸發器

施密特觸發器如圖(二)所示，其輸出電壓經由 R_1 、 R_2 分壓後送回到運算放大器的非反相輸入端形成正回授。因為正反饋會產生滯後 (Hysteresis) 現象，所以只要噪聲的大小在兩個臨界電壓，上臨界電壓 (V_{TH}) 及下臨界電壓 (V_{TL})，形成的滯後電壓範圍內，即可避免噪聲誤觸發電路。對於這一電路，翻轉發生在接近地的位置，遲滯量由 R_1 和 R_2 的阻值控制：

電路如圖(二)所示，運算放大器的輸出電壓在正、負飽和之間轉換：

$$V_o = \pm V_{sat}。輸出電壓經由 R_1、R_2 分壓後反饋到非反相輸入端：v_+ = \beta v_o，$$

其中反饋因數 $\beta = \frac{R1}{R1 + R2}$ 。

當 v_o 為正飽和狀態 ($+V_{sat}$) 時，由正反饋得上臨界電壓

$$V_{TH} = \beta \times v_o = \frac{R1}{R1 + R2} \times (+V_{sat}) = \frac{R1}{R1 + R2} V_{sat}$$

當 v_o 為負飽和狀態 ($-V_{sat}$) 時，由正反饋得下臨界電壓

$$V_{TL} = \beta \times v_o = \frac{R1}{R1 + R2} \times (-V_{sat}) = -\frac{R1}{R1 + R2} V_{sat}$$

V_{TH} 與 V_{TL} 之間的電壓差為滯後電壓：

$$V_H = V_{TH} - V_{TL} = 2\beta V_{sat} = \frac{2R1}{R1 + R2} V_{sat}$$

輸入、輸出波形圖(二)(a) 所示，轉換特性曲線如圖(三)所示。

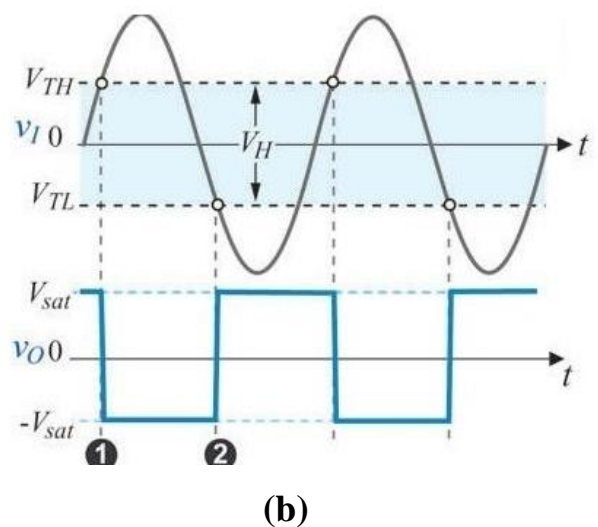
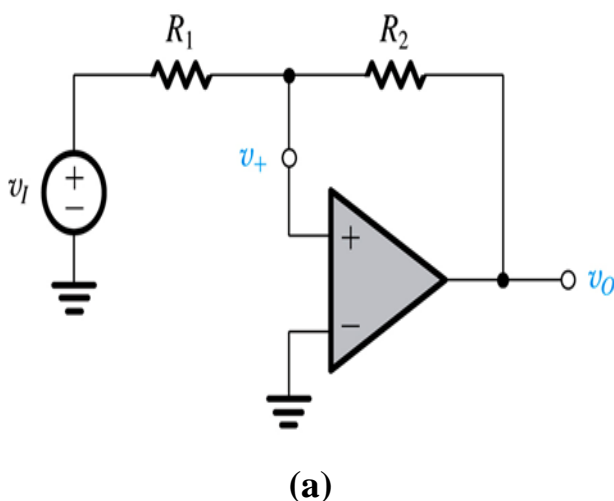
當輸入信號上升到大於上臨界電壓 V_{TH} 時，輸出信號由正狀態轉變為負狀態即：

$$v_i > V_{TH} \rightarrow v_o = -V_{sat} \text{ (或 } L_- \text{)}$$

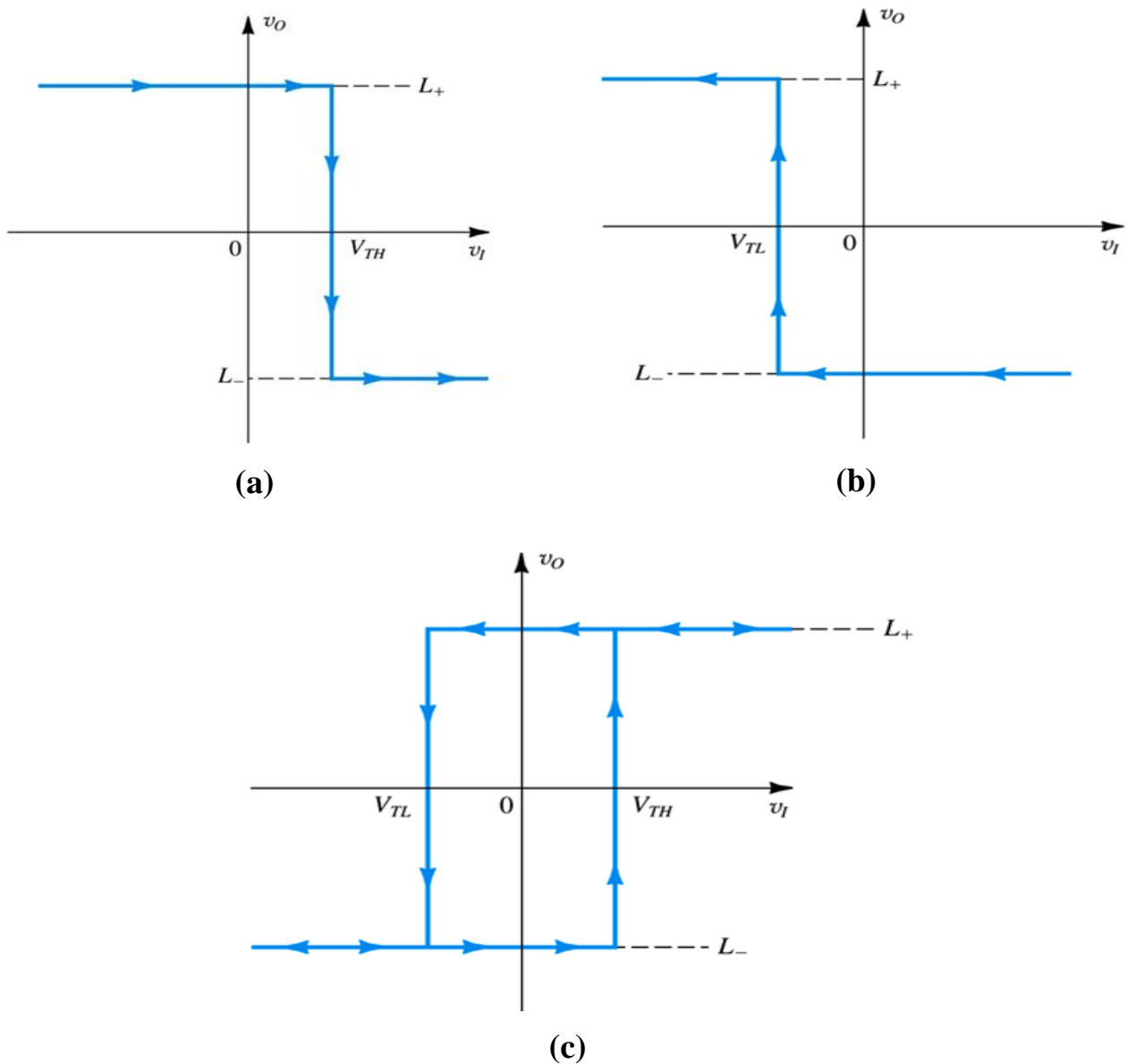
當輸入信號下降到小於下臨界電壓 V_{TL} 時，輸出信號由負狀態轉變為正狀態

$$\text{即： } v_i < V_{TL} \rightarrow v_o = +V_{sat} \text{ (或 } L_+ \text{)}$$

輸出信號在正、負兩狀態之間轉變，輸出波形為方波。



圖(二)：反相施密特觸發器(a)、輸出入波形(b)[2]



圖(三)：反相施密特觸發器轉換特性[3]

2-2. 非反相施密特觸發器

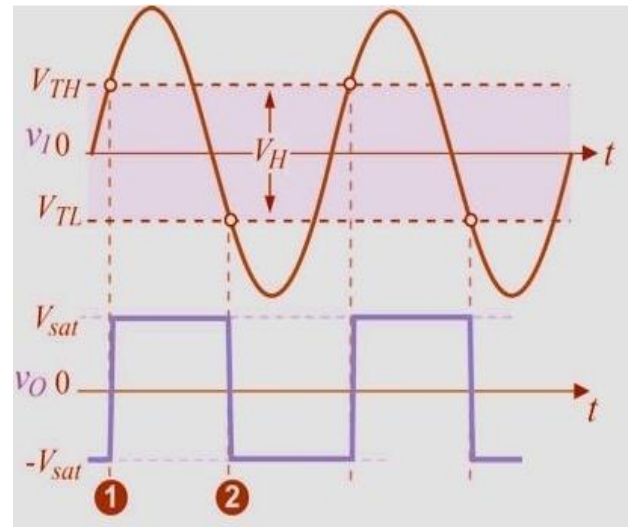
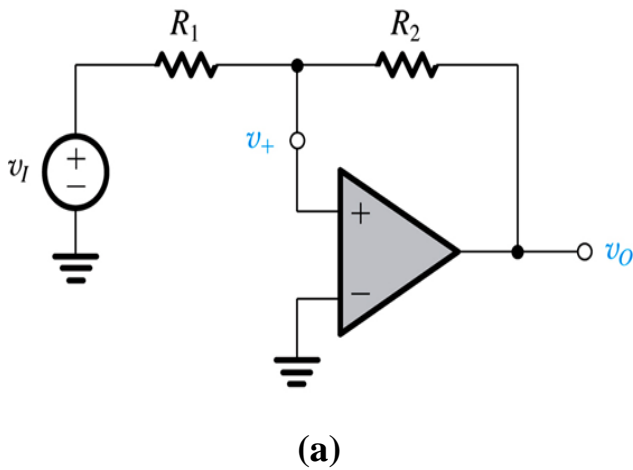
非反相施密特電路的輸入信號與回授信號接至非反相輸入端，如圖(四)所示。由重疊定理可得非反相端電壓

$$v_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_I + \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_O$$

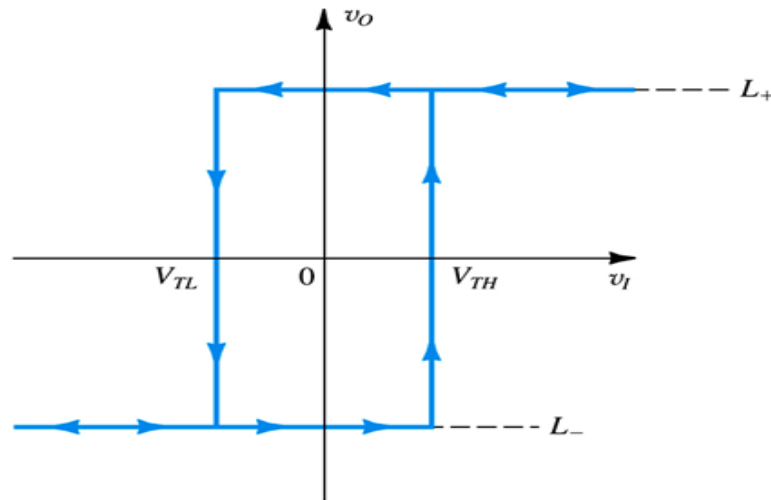
反相輸入端接地： $v_- = 0$ 。當 $v_+ = v_- = 0$ 時的輸入電壓即為臨界電壓。

將 $v_+ = 0$ 代入上式得 $0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_I + \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_O$

整理後，得臨界電壓 $v_I = -\frac{R_1}{R_2} v_O$



圖(四)：非反相施密特觸發器(a)、輸出入波形(b)[2]



圖(五)：非反相施密特觸發器轉換特性[3]

當 v_o 為負飽和狀態時，可得上臨界電壓 $V_{TH} = -\frac{R1}{R2}(-V_{sat}) = +\frac{R1}{R2}V_{sat}$

當 v_o 為正飽和狀態時，可得下臨界電壓， $V_{TL} = -\frac{R1}{R2}(+V_{sat}) = -\frac{R1}{R2}V_{sat}$

V_{TH} 與 V_{TL} 之間的電壓差為滯後電壓：

$$V_H = V_{TH} - V_{TL} = \frac{2R1}{R2}V_{sat}$$

非反相施密特觸發器轉換特性如圖(五)所示。

當輸入信號下降到小於下臨界電壓 V_{TL} 時，輸出信號由正狀態轉變為負狀態： $v_I < V_{TL} \rightarrow v_O = -V_{sat}$ (或 L_-)

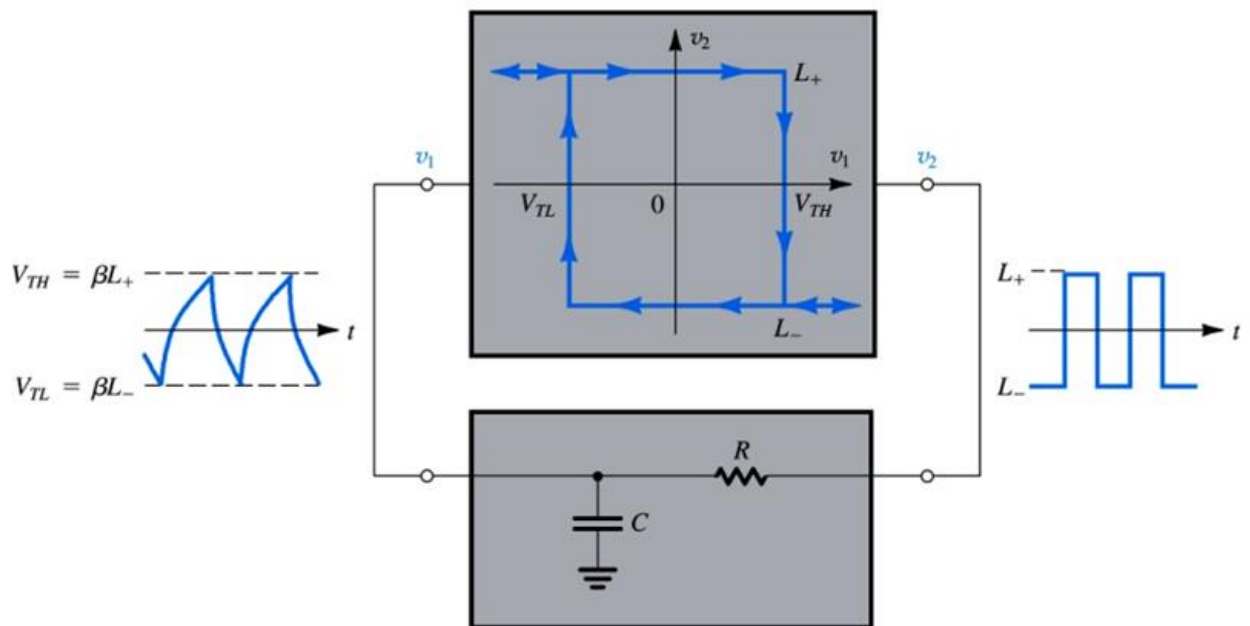
當輸入信號上升到大於上臨界電壓 V_{TH} 時，輸出信號由負狀態轉變為正狀態：

$$v_I > V_{TH} \rightarrow v_O = +V_{sat} \text{ (或 } L_+)$$

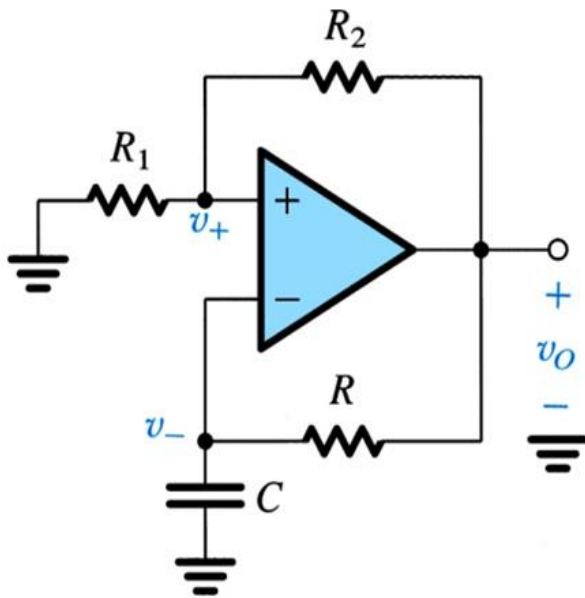
輸出信號在正、負兩狀態之間轉變，輸出波形為方波。

3. 方波產生器

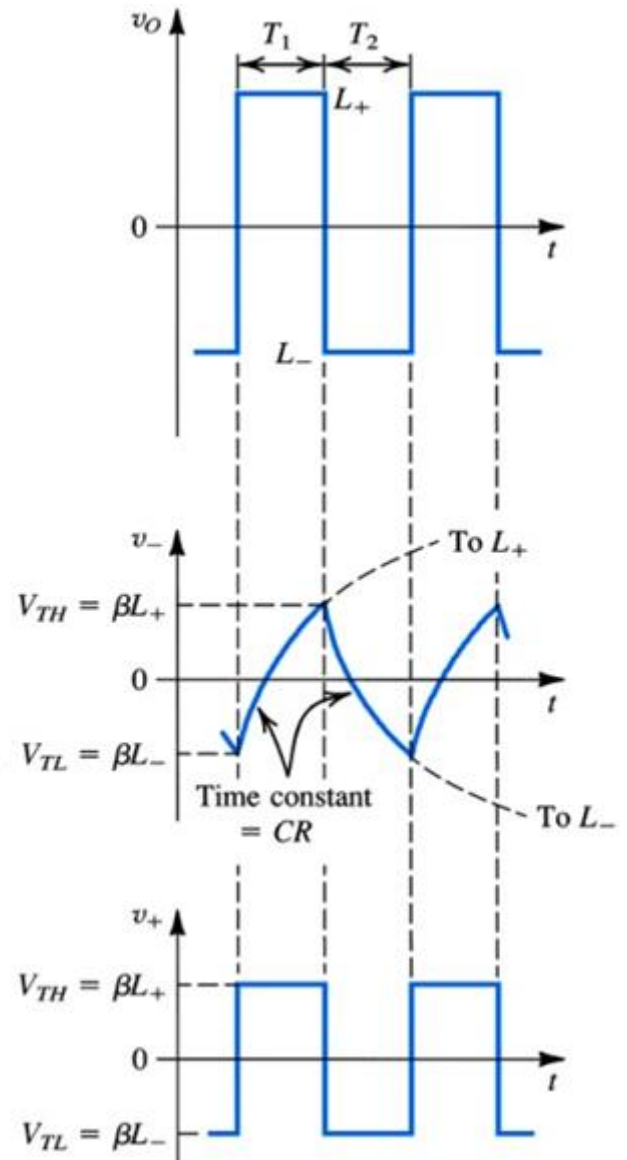
在方波產生器電路中，運算放大器是作為比較器來使用的。此一比較器稱為施密特觸發器或稱為再生式比較器，在此電路結構中反相施密特觸發器之輸出與反相輸入端之間接上一個 RC 的回授網路，因為施密特觸發器為正回授架構，所以在沒有外加訊號的情況下，會自行產生輸出，即可變成一個自發式的方波產生器，圖(七)為其節點波形。



圖(六)：雙穩態複振器與 RC 電路[3]



(a)



(b)

圖(七)：方波產生器與其波形[3]

3-1. 電路動作說明：

a. 公式之推導

參閱圖(八)方波產生器模擬電路圖。當節點 A 電壓增至 D1 及 D2 之串聯電壓和 $(V_D + V_Z)$ 時，D1 崩潰，D2 導通，節點 A 電壓被限制在 $V_A = V_D + V_Z$ ，回授

電壓 $\beta V_A = \frac{R5}{R4 + R5} \times V_A$ 。

V_A 經由 R1 對電容 C1 來充電，電容 C1 兩端的壓降為 $v_c(t)$ ，電容 $v_c(t)$ 由 $-\beta V_A$

朝 V_A 充電，經半週期($\frac{T}{2}$)之後，電容 $v_c(t) = \beta V_A$ ，此時節點 A 電壓變成 $-V_A$ 。

充電公式為： $v_c(t) = (V_A - \beta V_A)[1 - (1 + \beta)e^{-\frac{t}{R1C1}}] - \beta V_A = V_A[1 - (1 + \beta)e^{-\frac{t}{R1C1}}]$

電容 $v_c(t)$ 由 $(-\beta V_A)$ 充電到 $(+\beta V_A)$ 所需之時間為 $(t = \frac{T}{2})$ 。

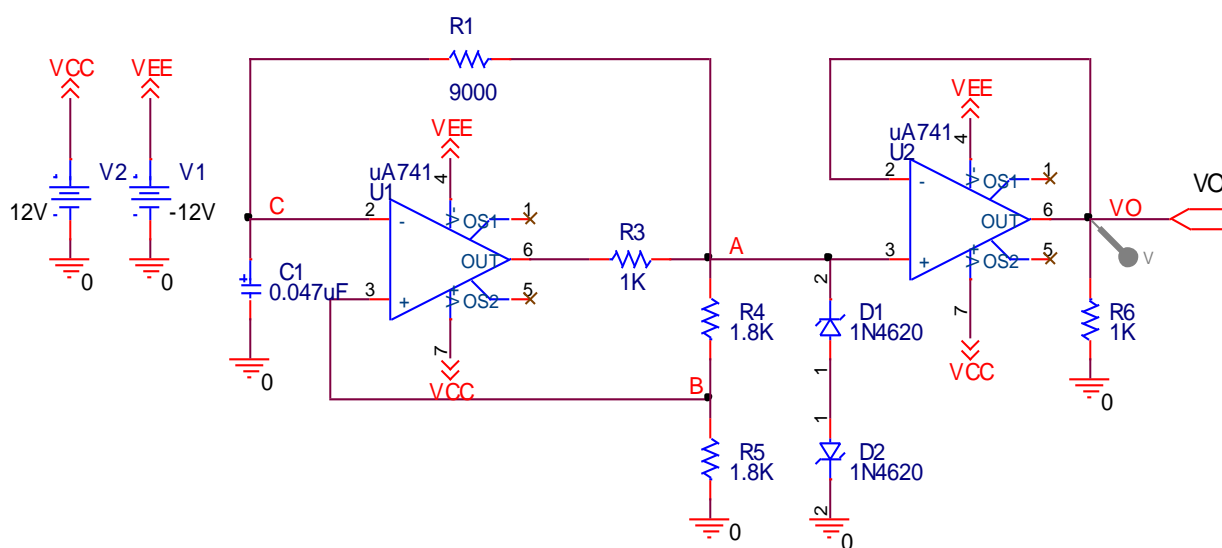
$$v_c\left(\frac{T}{2}\right) = \beta V_A = V_A[1 - (1 + \beta)e^{-\frac{T}{2R1C1}}],$$

$$(1 + \beta)V_A e^{-\frac{T}{2R1C1}} = V_A(1 - \beta)$$

$$\frac{T}{2R1C1} = \ln\left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta}\right), \text{ 其中 } \beta = \frac{R5}{R4 + R5}$$

$$\text{可算出振盪之時間週期 } T = 2R1C1 \times \ln\left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta}\right) = 2R1C1 \times \ln\left(1 + \frac{2R5}{R4}\right)$$

若 $R4 = R5$ ，則 $\beta = 0.5$ ，可求出振盪頻率 = $\frac{1}{2R1C1 \ln 3}$ 。



※電容 C1 設定 IC=0.5V(初始值電壓)

圖(八)：方波產生器模擬電路圖

b.設計電阻 R3

$uA741$ 之短路輸出電流為 $25mA$ ，在此設定其最大輸出電流為 $10mA$ ，即

$$I_{R3} = 10mA。$$

$$R3 = \frac{V_{A(sat)} - (V_Z + V_D)}{I_{R3}}, \text{ 其中 } \left(\begin{array}{l} V_{A(sat)}: \text{運算放大器的輸出飽和電壓約}13\text{V} \\ V_Z: \text{為Zener Diode的崩潰電壓}2.7\text{V} \\ V_D: \text{二極體的導通電壓約為}0.6\text{V} \end{array} \right)。$$

$$R3 \approx \frac{13\text{V} - (2.7\text{V} + 0.6\text{V})}{10\text{mA}} \approx 970\Omega, \text{ R3 選用 } 1\text{K}\Omega。$$

c.設計電阻 R4 與 R5

為了忽略 OP AMP 之輸入偏壓電流，設定流過 R4 之電流為 $I_{R4} = 1\text{mA} \approx I_{R5}$ 。

$$R4 + R5 = \frac{V_Z + V_D}{I_{R4}} = \frac{2.7\text{V} + 0.6\text{V}}{1\text{mA}} = 3.3\text{K}\Omega, \text{ 選定 } \beta = 0.5, \text{ 則 } R4=R5=1.65\text{K}\Omega,$$

選用 $R4=R5=1.8\text{K}\Omega$ 。

d.設計電阻 R1 與電容 C1(範例說明)

若振盪之頻率為 1KHz，週期(T)=1ms。

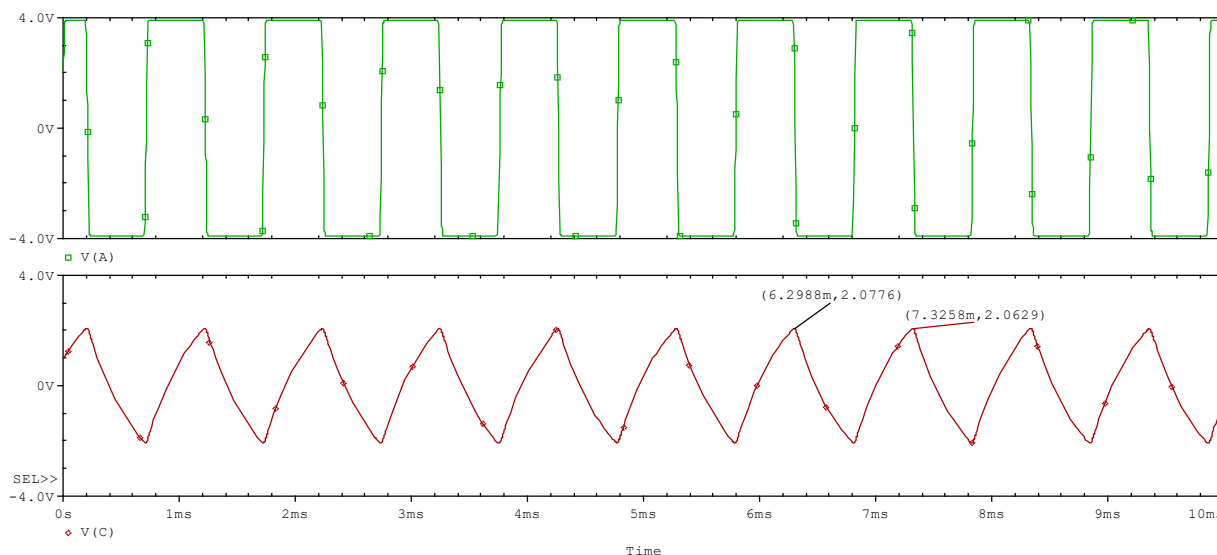
由振盪公式知

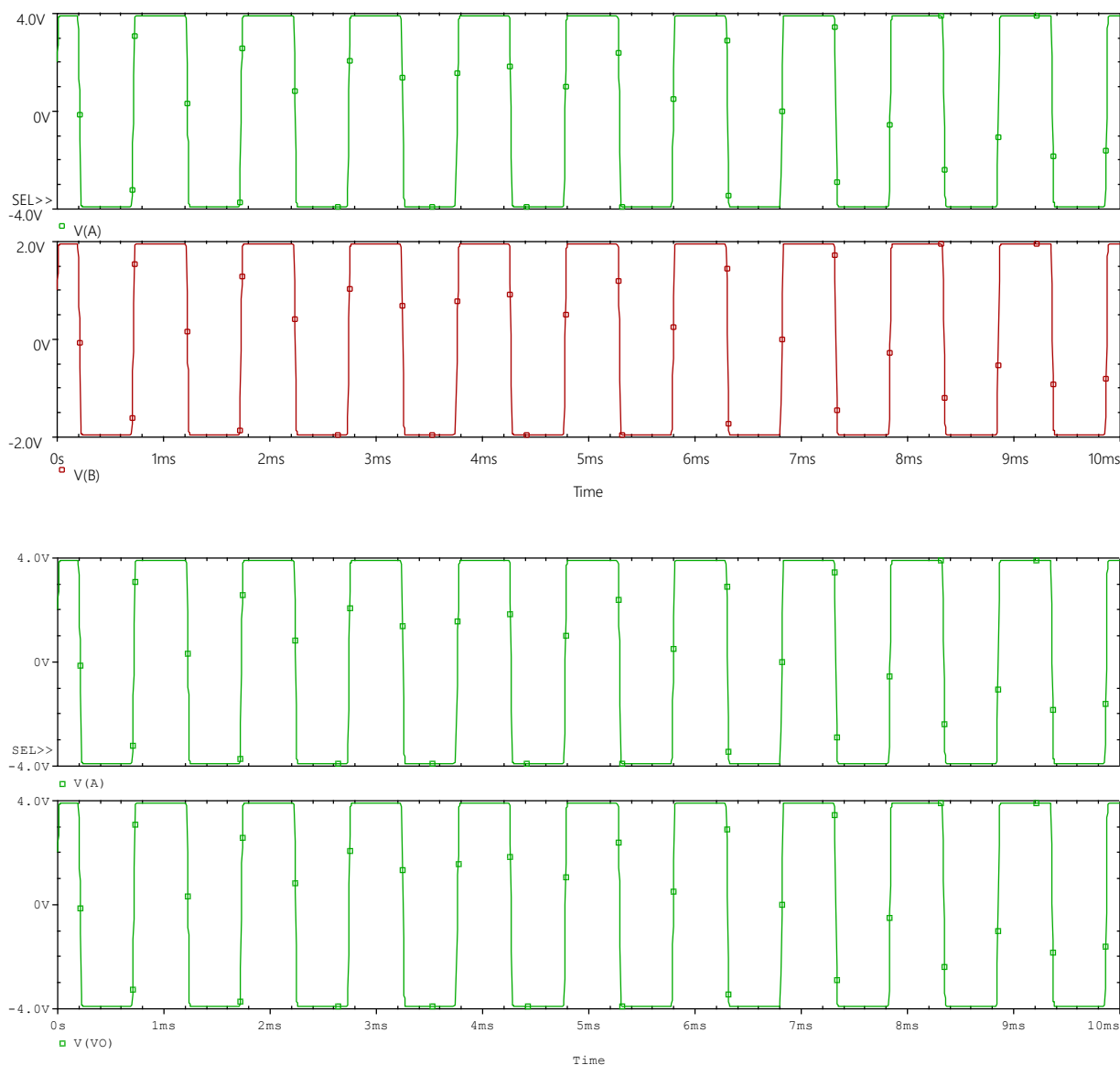
$$\frac{1}{2R1C1\ln 3} = \frac{1}{T}, R1C1 = \frac{1\text{ms}}{2\ln 3} \approx 4.55 \times 10^{-4}$$

選用 $C1=0.047\mu\text{F}$ ，則 $R1 \approx 9.68\text{K}\Omega$ 。

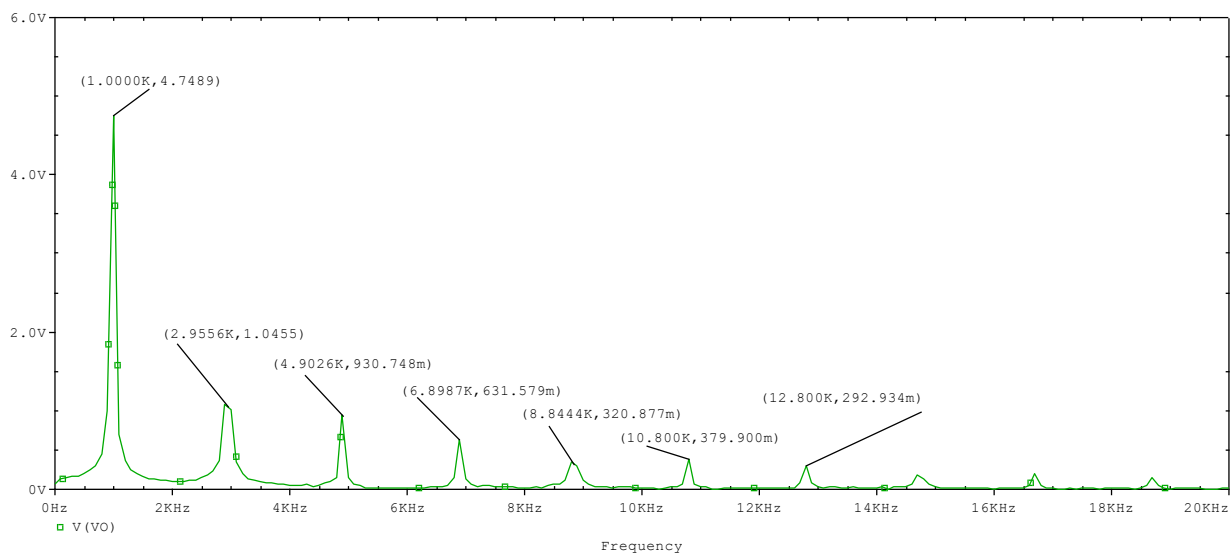
圖(一)中 $R1=9\text{K}\Omega$ ，這是經過調整之後所得到的模擬結果，結果會與計算值有差異，造成此結果的最大因素，為 OP AMP 存在輸入電容之故。

e.方波產生器電路模擬結果





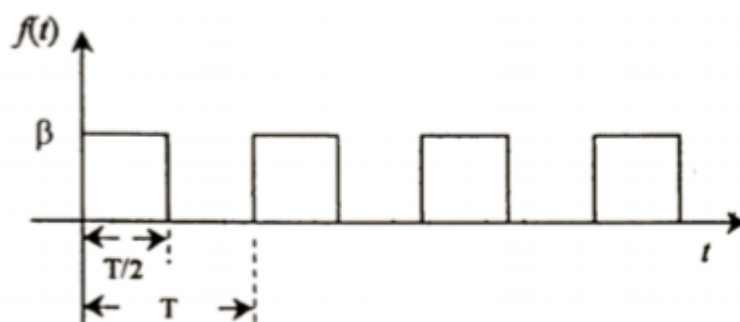
圖(九)：方波產生器模擬結果圖(time-domain)



圖(十)：方波產生器模擬結果圖(FFT)

由 FFT 轉換知，方波是由基本頻率及奇次諧波所合成的。

而在研習工數或訊號與系統時，方波可以由富立葉(Fourier Series)級數展開



圖(十一)：方波波形圖

其 Fourier Series 展開式如下：

$$f(t) = \beta \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1,3,5,7,\dots}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin \frac{2n\pi}{T} t \right) \begin{pmatrix} \beta: \text{為方波振幅} \\ T: \text{為方波週期} \end{pmatrix}$$

五、實驗注意事項與電路模擬

1. 使用萬用電錶之注意事項：測量電壓及電阻時，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，測量出頻率值及峰-峰值(Vp-p)，若未顯示上述之測量結果，則需重新擷取波形。

表格(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

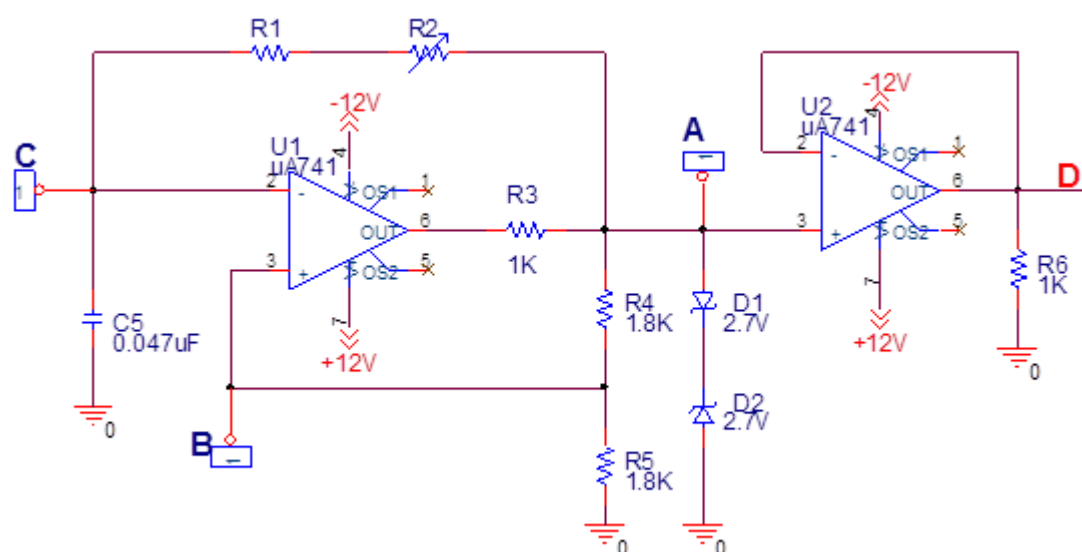
組別	振盪頻率	組別	振盪頻率	組別	振盪頻率
No.5-2	2.0KHz	No.15-2	2.0KHz	No.25-2	2.0KHz
No.6-1	2.1KHz	No.16-1	2.1KHz	No.26-1	2.1KHz
No.6-2	2.2KHz	No.16-2	2.2KHz	No.26-2	2.2KHz
No.7-1	2.3KHz	No.17-1	2.3KHz	No.27-1	2.3KHz
No.7-2	2.4KHz	No.17-2	2.4KHz	No.27-2	2.4KHz
No.8-1	2.5KHz	No.18-1	2.5KHz	No.28-1	2.5KHz
No.8-2	2.6KHz	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

六、實驗步驟

■實驗實作電路(一)：方波產生器電路(不含 D1、D2)。

1. 實驗設計與電路模擬：參閱圖(6-1)實驗電路圖(1)，依據實驗振盪公式及各組別的頻率要求，見表格(三)內容，可給定電容 $C5=0.047\mu\text{F}$ (電容 473)，計算電阻，選用適當的電阻值，完成實驗模擬。

◎計算列式：繳交實驗預習上課筆記。



圖(6-1)：實驗電路圖(1)

※R2，選用可變電阻 5KΩ。

3. 除元件 D1、D2、C5X(電容更換值)外，組裝 IC-uA741 及方波產生器電路等

元件。

4. 接 DC±12V 直流電源。

5. 適當調整可變電阻，使得節點[D]之振盪頻率＝依規定之頻率值。

6. 擷取節點[D]方波波形，使用示波器時間測量功能，測量 t_r 及 t_f 值及頻率值。

7. 擷取下列各節點的波形：節點[A，B]，節點[A，C]，節點[B，C]，並完成數據測量與記錄。

8. 問題與討論(1)：請說明節點[A，B]，節點[A，C]，節點[B，C]間波形變化之情形，並說明造成此一現象的原因。

9. 擷取波形圖：測量峰-峰值(Vp-p)。

a. 節點[D]波形：記錄頻率值＝_____、測量 t_r ＝_____、測量 t_f ＝_____。

b. 節點[A，B] 波形：記錄頻率值＝_____、測量節點[A]峰-峰值(Vp-p)＝_____、測量節點[B]峰-峰值(Vp-p)＝_____。

c. 節點[A，C] 波形：記錄頻率值＝_____、測量節點[A]峰-峰值(Vp-p)＝_____、測量節點[C]峰-峰值(Vp-p)＝_____。

d. 節點[B，C] 波形：記錄頻率值＝_____、測量節點[B]峰-峰值(Vp-p)＝_____、測量節點[C]峰-峰值(Vp-p)＝_____。

■實驗實作電路(二)：方波產生器電路(含 D1、D2)。

10. 組裝元件 D1 及 D2。

11. 適當調整可變電阻 R2，使得節點[A]之振盪頻率＝依規定之頻率值。

12. 擷取節點[D]方波波形，使用示波器時間測量功能，測量 t_r 及 t_f 值及頻率值。

13. 擷取下列各節點的波形：節點[A，B]，節點[A，C]，節點[B，C]，並完成數據測量與記錄。

14. 問題與討論(2)：請說明節點[A，C]與前項測試項目(7)節點[A，C]之測試結果有何不同，並說明造成此一現象的原因。

15. 擷取波形圖

a. 節點[D]波形：記錄頻率值＝_____、測量 t_r ＝_____、測量 t_f ＝_____。

b.節點[A, B] 波形：記錄頻率值=_____、測量節點[A]峰-峰值(V_{p-p})
=_____、測量節點[B]峰-峰值(V_{p-p})=_____。

c.節點[A, C] 波形：記錄頻率值=_____、測量節點[A]峰-峰值(V_{p-p})
=_____、測量節點[C]峰-峰值(V_{p-p})=_____。

d.節點[B, C] 波形：記錄頻率值=_____、測量節點[B]峰-峰值(V_{p-p})
=_____、測量節點[C]峰-峰值(V_{p-p})=_____。

16. **振盪頻率範圍測量**：適當調整可變電阻 R2，記錄頻率輸出範圍值與測量數據。擷取節點[D]波形圖，並完成數據測量與記錄。

17. **擷取下列各波形圖**：

a.節點 [D] 波形：記錄最大頻率值=_____、測量節點 [D] 峰-峰值(V_{p-p})=_____。

b.節點 [D] 波形：記錄最小頻率值=_____、測量節點 [D] 峰-峰值(V_{p-p})=_____。

18. **更換電容值對電路的影響**：

a.拆除 C5，組裝 $C5X=0.001\mu F$ ，調整可變電阻 R2，使用示波器觀察及擷取節點[D]波形，記錄頻率範圍值及波形變化情形。

b.問題與討論(3)：試說明節點[D]的輸出波形與前項測試項目(12)之測試結果有何不同，請說明造成此一現象的原因。

c.**擷取下列節點波形圖**：

①.節點[D]之波形：

②.記錄頻率範圍值=_____、測量節點[D]峰-峰值(V_{p-p})=_____。

19. **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[A]，CH2 接節點[B]，調整好頻率值，輸出波形不可失真，測量頻率值及峰-峰值(V_{p-p})。

20. **擷取下列節點波形圖**：

a.節點[A, B]波形：記錄頻率值=_____、測量節點[A]峰-峰值(V_{p-p})=_____、測量節點[B]峰-峰值(V_{p-p})=_____。

七、實驗問題與討論

- 1.就步驟[8]的實驗結果，請說明節點[A，B]，節點[A，C]，節點[B，C]間波形變化之情形，並說明造成此一現象的原因。
- 2.就步驟[14] (含 D1、D2)的實驗結果，請說明節點[A，C]與前項測試項目(7) (不含 D1、D2)節點[A，C]之測試結果有何不同，並說明造成此一現象的原因。
- 3.就步驟[18]更換電容值對電路的影響實驗結果，試說明節點[D]方波波形，測量 t_r 及 t_f 值及頻率值與前項測試項目(含 D1、D2)之測試結果有何不同，請說明造成此一現象的原因。
- 4.就步驟[18]更換電容值對電路的影響實驗結果，請說明方波產生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]. From Wikipedia, Multivibrator

<http://en.wikipedia.org/wiki/Multivibrator>

[2]. From Wikipedia, Schmitt_Trigger

http://en.wikipedia.org/wiki/Schmitt_trigger

[3]. SEDRA & SMITH ，“MICROELECTRONIC CIRCUITS” ， Copyright by Oxford University Press,Inc, sixth edition 2010,P.1059～P.1069.

[4].“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.947～P.955.

[5].Sergio Franco ，“Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits” ， McGraw-Hill International Editions 1988,P.313～P.323,P.362～P.369.