

正回授

一、目的：

了解正回授，並利用正回授做成振盪器。

二、原理：

(a) 正回授與振盪：

「回授」就是從放大器的輸出取一部分送回輸入端。

圖 1 是無回授的放大器，輸入信號 X_s 經放大 A 倍後成為輸出 X_o 。圖 2 是有回授的放大器，回授網路從輸出 X_o 取 k 的比例送回輸入端，和輸入信號相減後才輸入放大器，所以現在輸入信號是 X_i ，輸出訊號是 AX_i ，因此

$$X_o = AX_i = A(X_s - X_f) = A(X_s - kX_o)$$

由這個關係可以得到

$$X_o = \frac{A}{1+kA} X_s$$

這個回授放大器的放大率為：

$$A_f = \frac{A}{1+kA}$$

若 $|1+kA| > 1$ ，則 $|A_f| < |A|$ ，有回授時放大率較小，這種回授稱為「負回授」。

若 $|1+kA| < 1$ ，則 $|A_f| > |A|$ ，有回授時放大率較大，這種回授稱為「正回授」。

現在考慮正回授的情形。當 $kA \rightarrow -1$ 時， $A_f \rightarrow \infty$ 。這時候縱使輸入信號 X_s 為零，輸出信號 X_o 仍然可以不為零。這個結果的意義如下：

當 $kA \rightarrow -1$ 時，環路放大率為 1，任何信號繞行一圈回到原地時大小不變，如圖 3 所示。因此，電路上的雜訊或開機時的瞬態可以維持不變，這說明了為何輸入信號為零，輸出信號仍然可以不為零。

環路放大率若恰好等於 1，當狀況改變時(如溫度，元件老化)，可能降為小於 1，因此通常使它略大於 1。

環路放大率略大於 1 時，信號每繞行環路一周就被放大一次，因此，在極短的時間內，成長到電路容許的

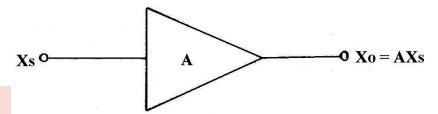


圖 1 無回饋的放大器。

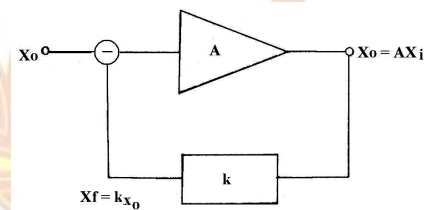


圖 2 有回饋的放大器。

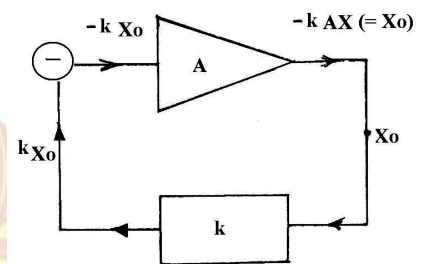


圖 3 環路放大率為 1。

最高電壓或最低電壓。因此在這種情形下，輸出端的電壓不是接近電源電壓就是接近零，不會有振盪波形出現。

如果使回授網路對頻率有選擇性，只有某一頻率的信號繞行環路一周能維持相位不變，則只有這一個頻率的信號可以成長。這個頻率的信號生長到為放大器的非線性區域限制住(如電晶體的飽和區和截止區)，因此輸出的波形多少有些變形，不是完美的正弦波。回授較大時，波形的變形較大。回授量較小時，波形的變形較小，但狀況稍有改變就可能停止振盪。因此需要一個自動調節回授大小的裝置，當振幅大時，自動降低回授，以減少變形，當振幅小時，自動增加回授，以防振盪停止。

總之，正回授的振盪器要成為正弦波振盪器必須符合下列三條件：

1. 回授網路須對頻率有選擇性，只有某一頻率的信號繞環路一周後相位不變。
 2. 這個頻率的信號的環路放大率須大於 1。
 3. 必須有自動調節回授大小的裝置，以減少波形的變形。
- (b) LC 振盪器的一般形式：

只要符合上述三個條件的正回授放大器都可成為正弦波振盪器。因此振盪器有很多種形式，並不一定要由 LC 網路做成，事實上，一般的振盪器大都是由 RC 網路做成的。以下我們要介紹 LC 振盪器，只因為 LC 振盪器有對應的力學系統。

圖 4 的 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 是 LC 構成的回授網路，放大器的輸出 v_o 經此網路取出 $-kv_o$ 回授到輸入端。這裡用 $-kv_o$ 而不用 kv_o 是為了套用前面負回授的公式。放大器的輸入阻抗 R_i 為了分析方便可假設為無限大。 R_o 代表放大器的輸出阻抗。 k 的值可以直接了當地算出：

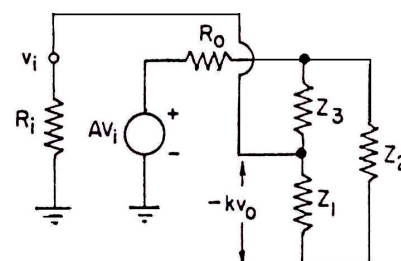


圖 4

$$k = -\frac{\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_1 + Z_3}}{R_o + \frac{1}{\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_1 + Z_3}}} \cdot \frac{Z_1}{Z_2 + Z_3}$$

$$= -\frac{Z_1 Z_2}{R_o(Z_1 + Z_2 + Z_3) + Z_2(Z_1 + Z_3)}$$

令 $Z_1=jX_1$, $Z_2=jX_2$, $Z_3=jX_3$ 代入上式

$$k = \frac{X_1 X_2}{jR_0(X_1 + X_2 + X_3) - X_2(X_1 + X_3)}$$

因此

$$kA = \frac{AX_1 X_2}{jR_0(X_1 + X_2 + X_3) - X_2(X_1 + X_3)}$$

成為振盪器的條件之一是，若 A 為實數，比較左右兩邊可得到

$$\begin{aligned} X_1 + X_2 + X_3 &= 0 \\ -\frac{AX_1}{X_1 + X_3} &= \frac{AX_1}{X_2} = -1 \end{aligned}$$

上一個結果告訴我們，在振盪時， Z_1 、 Z_2 、 Z_3 剛好串聯共振，因此，串聯共振頻率就是振盪器的頻率。下一個結果告訴我們若放大器為倒相放大器， $A < 0$ ， X_1 和 X_2 同號，同時為電容，或同時為電感，而且放大器的放大率必須大於 X_2/X_1 ，否則無法振盪。

若 Z_1 ， Z_2 採用電容，由上一式可知 Z_3 為電感，這種振盪器稱為「Colpitts 振盪器(圖 5)」

若 Z_1 ， Z_2 採用電感，由上一式可知 Z_3 為電容，這種振盪器稱為「Hartley 振盪器(圖 6)」

上面的分析忽略了回授網路的電阻和放大器輸入端的負載。若考慮這兩項，結果將較複雜，故從略。

(c) 石英振盪器：

石英晶體是一種壓電材料，當它受到應力而變形時，晶體產生極化；反之，當置於電場中時，它產生變形，若所加的電場是交變的，可以使石英晶體發生振盪。石英晶體的等效電路如圖 7，其中 L 對應於晶體的質量， C 對應於晶體的順服性(力常數的例數)， R 對應於晶體的能量消耗， C' 是晶體表面電極間的電容。通常 L 極大， C 和 C' 均極小，而且 $C' \gg C$ 。

若忽略電阻 R ，可以算出它的電抗為：

$$X = -\frac{1}{\omega C} \frac{\omega^2 - \omega_s^2}{\omega^2 - \omega_p^2}$$

上式中 $\omega_s = \sqrt{1/LC}$ 是串聯共振頻率，

$\omega_p = \sqrt{1/L \times \sqrt{1/C + 1/C'}}$ 是並聯共振頻率。因 $C' \gg C$

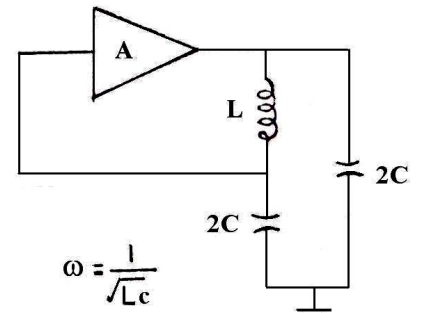


圖 5 Colpitts 振盪器(放大器為倒相)。

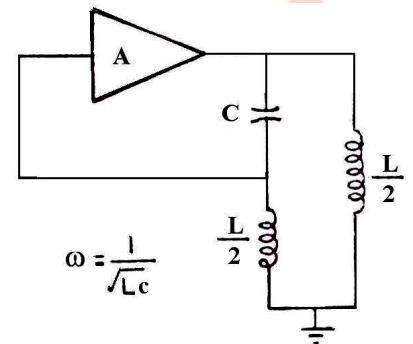


圖 6 Hartley 振盪器(放大器為倒相)。

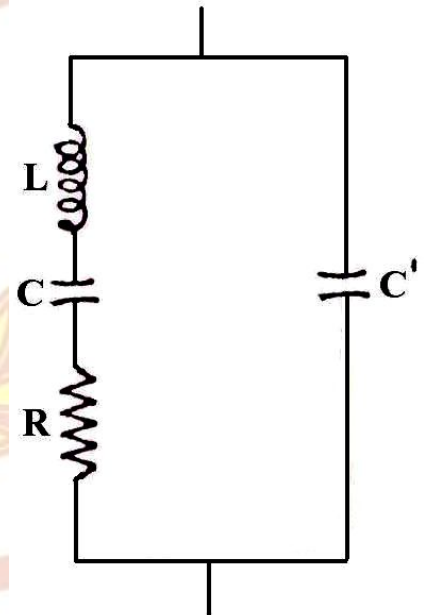


圖 7 石英晶體的等效電路。

， $\omega_s \approx \omega_p$ ， $\omega_p - \omega_s \ll \omega_s$ ， ω_p 。由圖 8 可以看出電抗在 ω_s ， ω_p 的小範圍內，由零上升到 ∞ 。如果使用石英晶體當作 Colpitts 振盪器的電感，可以得到很穩定的振盪頻率。因為當振盪電路變化時，石英晶體的頻率只要做很小的變化就可以造成電感很大的變化而補償振盪電路的變化。

石英晶體代替 Colpitts 振盪器後，振盪器的頻率為何？由串聯共振公式可知：

$$X_3 = -\frac{1}{2\omega C} - \frac{1}{2\omega C} = 0$$

這裡的 C 是 Colpitts 振盪電路的 C，故 $X_3 = 1/\omega C_0$ 。因此， $1/\omega C$ 曲線和 $X-\omega$ 關係曲線的交點，P 所對應的頻率就是振盪的頻率。由圖 9 可以看出，當 C 改變時，頻率變化很小。石英振盪器在現代鐘錶，儀器，通訊設備中應用很多。

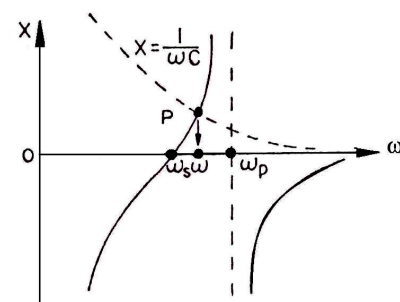


圖 8

三、儀器：

示波器、電源供給器、信號產生器、波型產生器、三用電表，數字型三用電表。

四、步驟：

(一) Colpitts 振盪器：

電路如圖 9。中央部分是前面實驗中用過的電晶體放大器。500 kΩ* 用來調節電晶體的偏壓。右邊部分是回授網路，回授信號從 P 點經 500 kΩ* 和 0.01 μF 輸入 B 極。0.01 μF 用來阻擋直流電流，以免 I_B 改變。500 kΩ 可以用來調節回授的大小，當 500 kΩ* 調大時，回授減少，當 500 kΩ* 調小時回授增加，在接近 LC 串聯網路的共振頻率時，這是一個正回授放大器，因為在串聯共振電路裡 LC 的電壓方向相反，其極性如圖 9 所示，P 點的反相電壓回授到反相的放大器被放大後又得到同相的電壓。

在前面分析振盪器時，我們採用正回授放大器的觀點，其實我們也可以採用 LC 共振電路的觀點。因此我們在 A，B 之間接一個信號產生器，觀察信號產生器輸出的方形波所引發的 LC 共振電路的阻滯振盪：

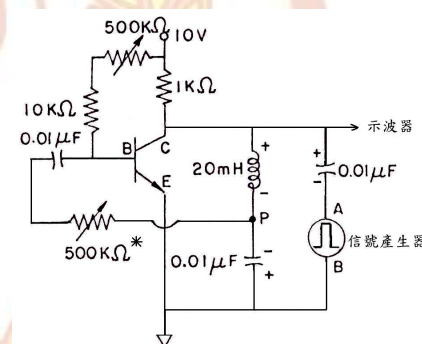


圖 9

$$q(t) = q_0 e^{-t/\tau} \cos \omega t$$

$$\tau = \frac{2L}{R}$$

$$\omega = \left(\omega_0^2 - \frac{1}{\tau^2} \right)^{1/2}$$

這是因為共振電路內有能量消耗，因此振幅呈指數衰減。如果我們從 P 點將信號輸入電晶體放大器，再把放大後的信號輸回 LC 共振電路，則 LC 共振電路得到的正回授可以補償能量的損失。這時候我們可看到 τ 延長的現象，如果回授的能量足夠補償損失的能量，我們會看到一個穩定的正弦波。在這種情形下我們可以把信號產生器取下，將 A, B 接通，仍然看到穩定的正弦波，因為放大器已經可以維持振盪，不必再依賴外加能量了。

1. 先調電晶體的偏壓：將信號產生器的輸出調到最小， $500\text{k}\Omega^*$ 調到最大。調 $500\text{k}\Omega^*$ ，使 C 極的直流電壓為 5V。
2. 將信號產生器的輸出調大，以 1 kHz 的方形波推動 LC 共振電路，觀察其阻滯振盪。
3. 將 $500\text{k}\Omega^*$ 調小，使正回授增加，注意振幅的衰減變慢的情形。
4. 將 $500\text{k}\Omega^*$ 調小，直到振盪的振幅不衰減。取下信號產生器，把 A, B 兩點拉通，仍舊可以看到穩定的振盪，這是正回授放大器自身的振盪，不再依賴外能量了。
5. 微調 $500\text{k}\Omega^*$ 使正弦波形完美，測其頻率和計算值 $1/2\pi LC$ 比較。

(二) 石英振盪器：

1. 電路如圖 10，以石英晶體當作電感。電容改用 60 pF 和 200 pF。
2. 慢慢調節 $100\text{k}\Omega$ 使振盪波形最完美。
3. 測振盪頻率，和石英晶體外般的標示值比較。

五、參考資料：

1. J. Millman & A. Grabel : Microelectronics, 2nd ed., (McGraw-Hill Book company), §15-1 ~ §15-5, p.659~ p.669。
2. A. S. Sedra & K. C. Smith : Microelectronic Circuits, 2nd ed., (HRW Inc.), §14-8 ~ §14-10, p.821~ p.837。

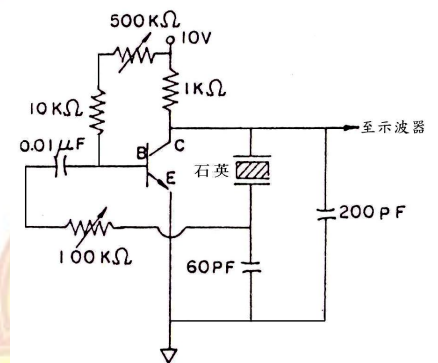


圖 10