



作者：陳明周(2002-09-09)，推薦：徐業良(2002-09-16)。

## 主動式濾波器簡介

擷取感測元件輸出之類比訊號時，常需使用「濾波器(filter)」以擷取某特定頻率範圍之訊號，除去不必要之雜訊。濾波器由各種電子元件組合電路而成，可分為被動(passive)和主動(active)兩種。被動式濾波器包含有電阻、電感、電容等電子元件，功能僅在過濾雜訊；主動式濾波器除電阻、電感、電容外，還包含有電晶體或運算放大器，可放大濾波後之訊號（即具有增益），且由於使用獨立電源，信號源與負載電路隔離性較佳，本文主旨即在針對主動式濾波器作介紹。

### 濾波器的基本分類

濾波器的目的在通過一特定頻帶的訊號，衰減此頻帶以外的所有訊號。依其功能可分「低通濾波器(low pass filter)」、「高通濾波器(high pass filter)」、「帶通濾波器(band pass filter)」、「帶拒濾波器(band reject filter)」等四種。圖 1 為四種濾波器的頻率響應圖，圖中橫座標為頻率( $\omega$ )，縱座標為濾波器輸出電壓，實線部份為理想濾波器的特性，虛線則是實際濾波器的特性， $f_c$  為「截止頻率(cutoff frequency)」、 $f_l$  為「低位截止頻率(low pass cutoff frequency)」、 $f_h$  為「高位截止頻率(high pass cutoff frequency)」、可通過的頻率範圍稱「通帶(pass band)」、被衰減的頻率範圍稱「停帶(stop band)」。

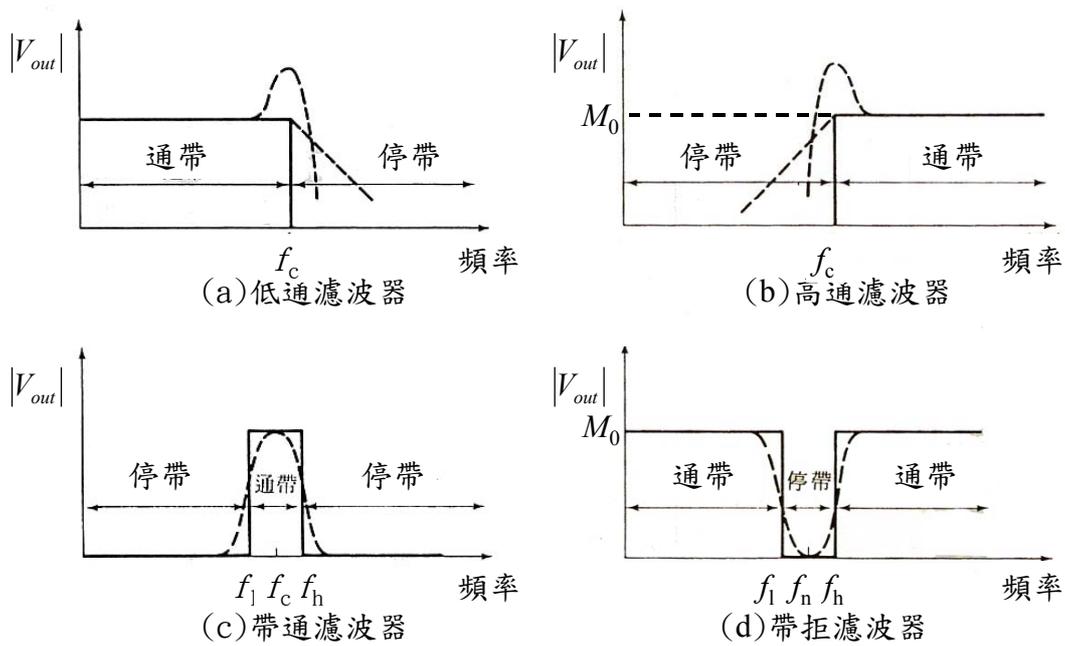


圖 1. 四種濾波器的頻率響應

濾波器的濾波效果好壞係指其衰減停帶頻率訊號的能力，濾波效果愈好的濾波器，停帶訊號被衰減的幅度就愈大。以圖 2 所示的低通濾波器頻率響應圖為例，實線表示的是理想狀態的濾波器，在通帶以外的訊號都被衰減至無，但現今仍無法達成，實際情況乃是如虛線所示，以截止頻率為中心緩慢衰減。而不同的濾波器，衰減的幅度也不同，主要是以階數(order)分類，階數愈高，效果愈好，但電路也愈複雜。本文將介紹高通及、通濾波器的一階與二階之電路及帶通、帶拒的常見電路。若須要更高階的濾波效果，只須將低階串聯即可達成，譬如三階可由一階串二階、四階可由二階串二階…更高階可依此類推(順序並沒有影響)。

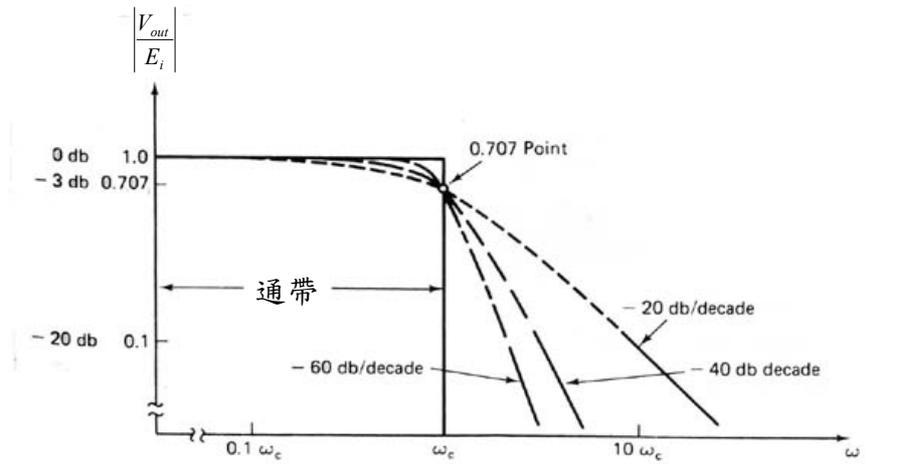


圖 2. 理想與三種低通濾波器頻率響應的比較

以下所介紹的低通與高通濾波器，可分成具有有限增益和單位增益放大器兩種濾波器。當欲擷取的訊號過於微小，A/D 轉換器無法讀取時，即可利用具有有限增益的濾波器在濾波的同時將訊號放大；訊號足已讀取不須放大時，則使用單增益的濾波器。同時在濾波器的介紹後，會有一個以 IsSpice 軟體製作的模擬範例，顯示此濾波器的效能。

### 低通濾波器

低通濾波器的功能是使低頻訊號通過，高頻訊號衰減，適用於高頻雜訊之過濾。例如溫度或流量感測器，訊號變化頻率低，即可用低通濾波器來除去如馬達產生的電氣雜訊。

圖 2(a)(b)為一階低通濾波器，圖 2(c)(d)為二階低通濾波器，將兩者串聯即形成一個三階低通濾波器低通濾波器，如圖 2(e)所示。

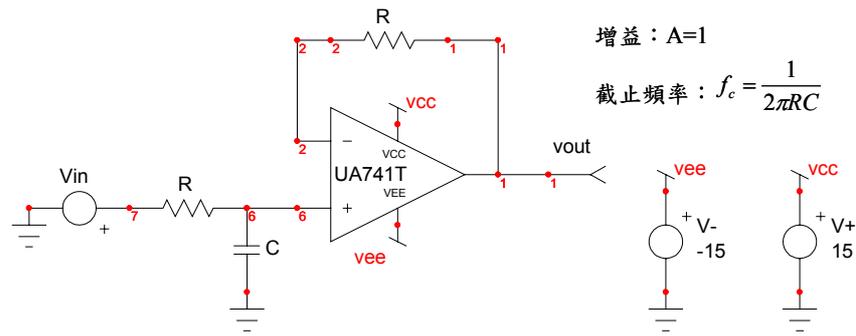


圖 2(a). 一階低通濾波器(單增益)

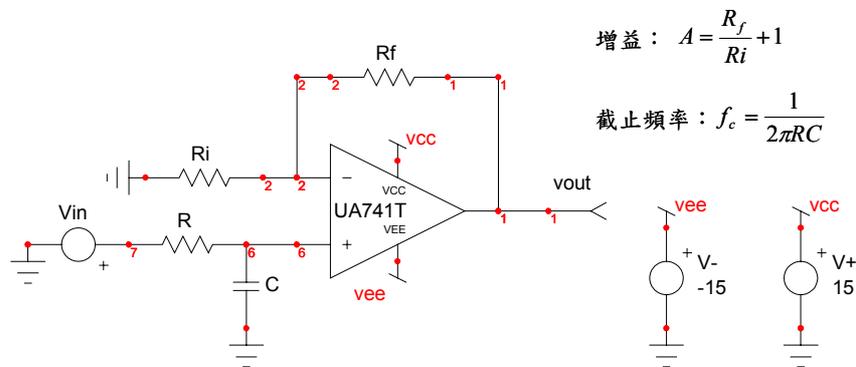


圖 2.(b) 一階低通濾波器(有限增益)

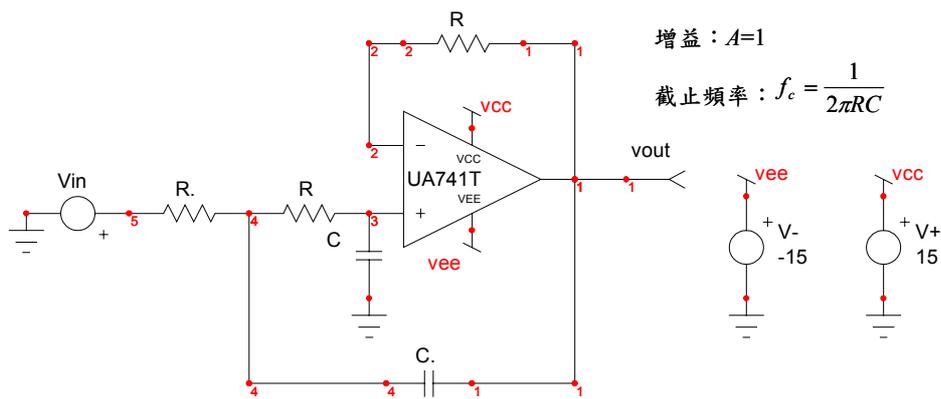


圖 2.(c) 二階低通濾波器(單增益)

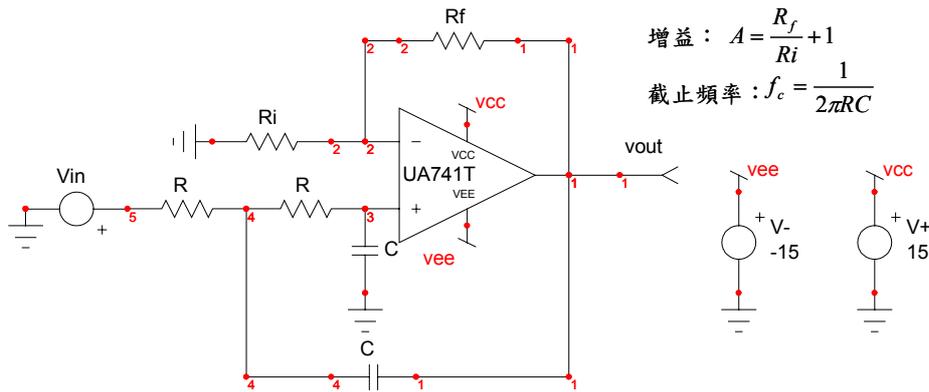


圖 2.(d) 二階低通濾波器(有限增益)

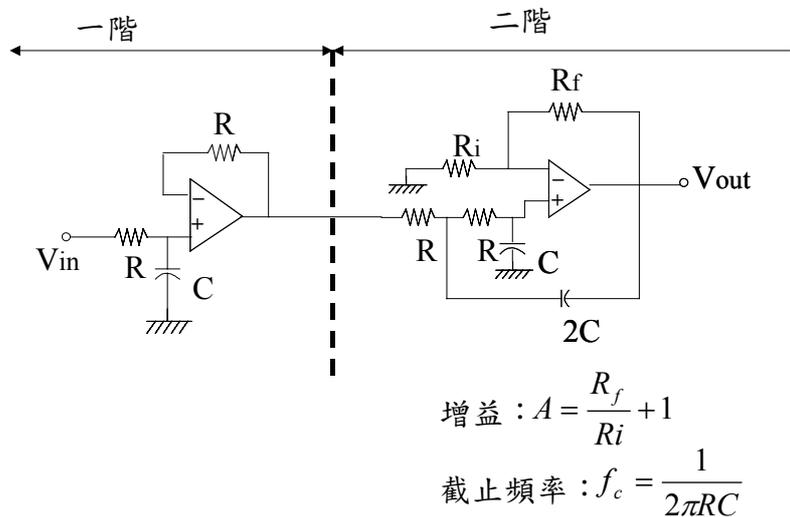


圖 2.(e) 三階低通濾波器

舉例說明：假設有一訊號  $V_{in}$  為振幅 2v、頻率 200Hz；伴隨振幅 0.4v、頻率 5kHz 的雜訊，因此要設計一個截止頻率為 1kHz 的單增益一階低通濾波器，C 採用 0.001  $\mu$ F(可自由選擇，通常在 0.001~0.1  $\mu$ F 之間)，則應搭配多大的電阻 R 呢？

由圖 2(a)可知  $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ ，則  $R = \frac{1}{2\pi C f_c} = \frac{1}{2\pi \times 0.001\mu \times 1k} = 159k\Omega$ ，但由於最佳

的 R 值在 10~100k $\Omega$  之間，所以反回將 C 改為 0.01  $\mu$ F，R 值成為 15.9k $\Omega$ ，採用 15 k $\Omega$  電阻即可(若無剛好阻值電阻，只須使用常見電阻中阻值最接近的電阻即可)。透過以上敘述，製作出如圖 3 的濾波器，以 IsSpice 軟體模擬得知會有如圖 4 的濾波效果。

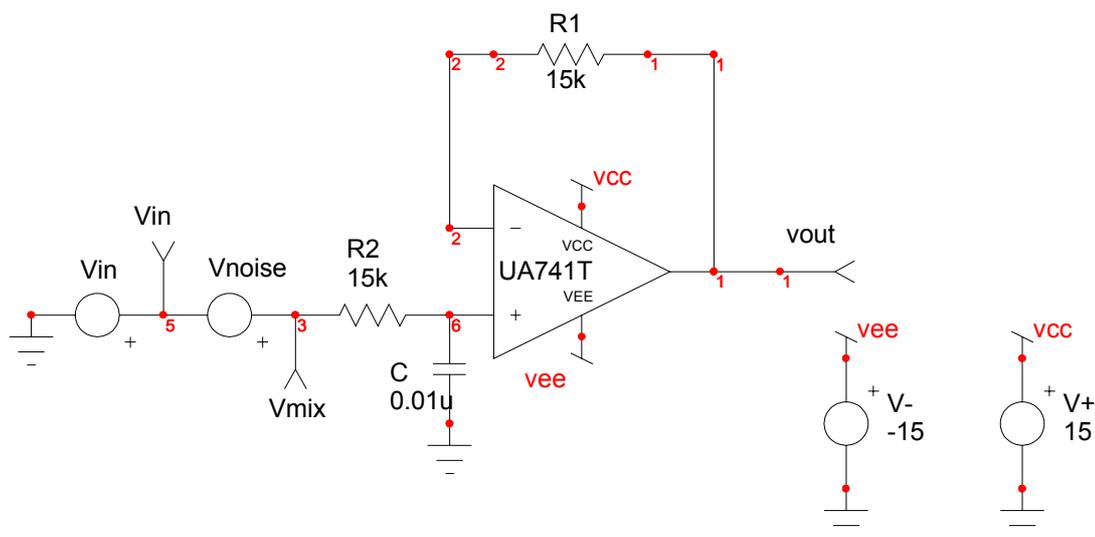


圖 3. 單增益、 $f_c \approx 1k$  的一階低通濾波器

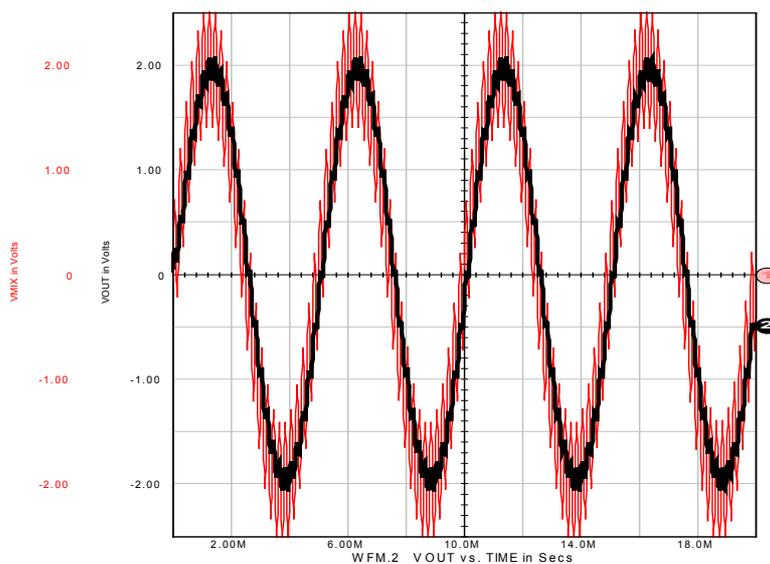


圖 4. 圖 3 濾波效果(1 :  $V_{mix}$ 、2 :  $V_{out}$ )

### 高通濾波器(high pass filter)

高通濾波器是指高於截止頻率之訊號通過，低於截止頻率之訊號衰減的電路。電路與低通濾波器相似，只是 R、C 之位置對調。

圖 5(a)(b)為一階高通濾波器，圖 5(c)(d)為二階高通濾波器，將兩者串聯即形成一個三階高通濾波器，如圖 5(e)所示。

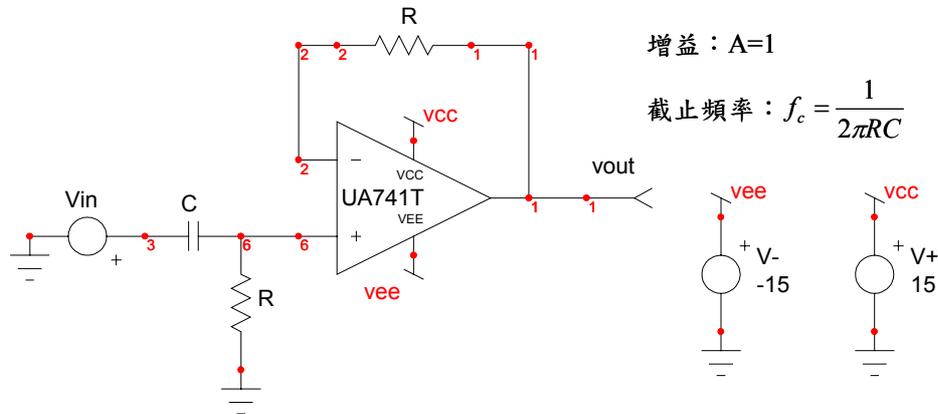


圖 5.(a) 一階高通濾波器(單增益)

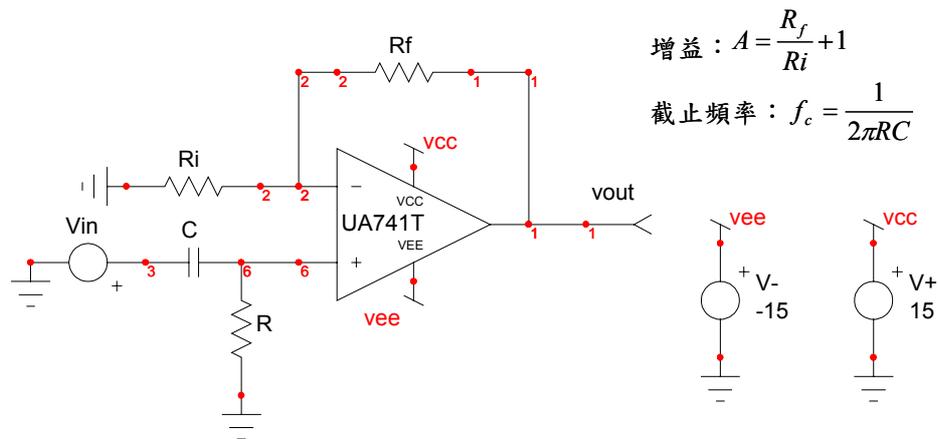


圖 5.(b) 一階高通濾波器(有限增益)

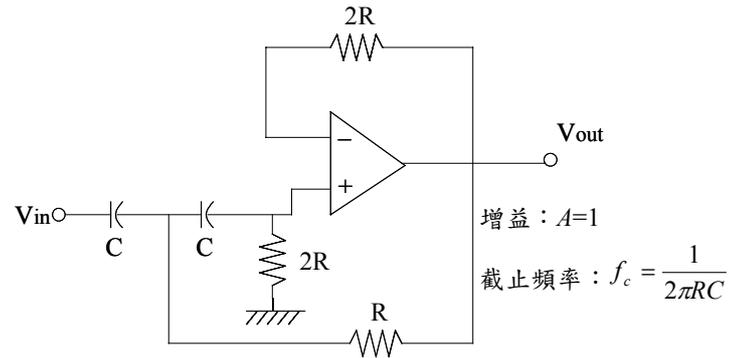


圖 5.(c) 二階高通濾波器(單增益)

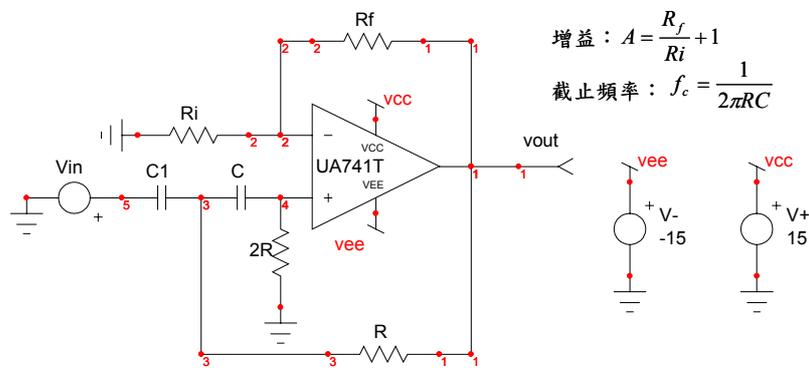


圖 5(d). 二階高通濾波器(有限增益)

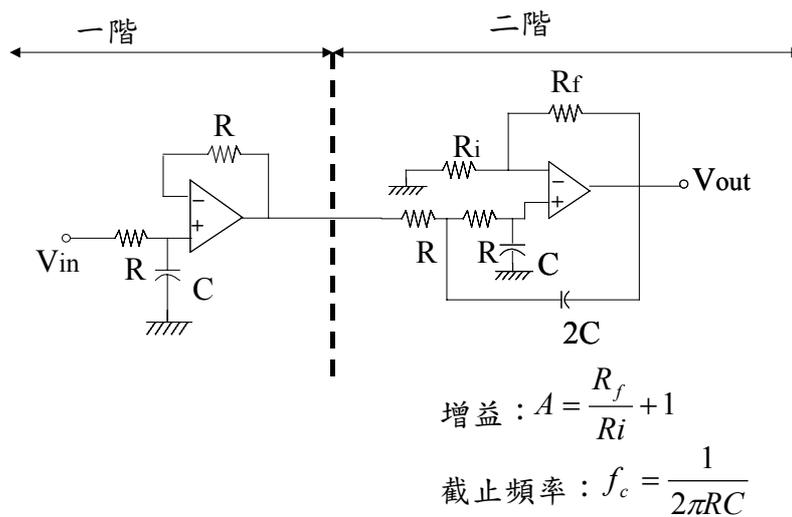


圖 5.(e) 三階高通濾波器

舉例說明：現有一輸入訊號  $V_{in}$  為振幅 1v、頻率 10k 的 Sin 波，但卻伴隨著振幅 2v、頻率 1k 的雜訊，因此使用如圖 6 所示，單增益、截止頻率為 1590Hz 的二階高通濾濾器，進行雜訊消除。以 IsSpice 軟體進行模擬，得到如圖 7 的波形。

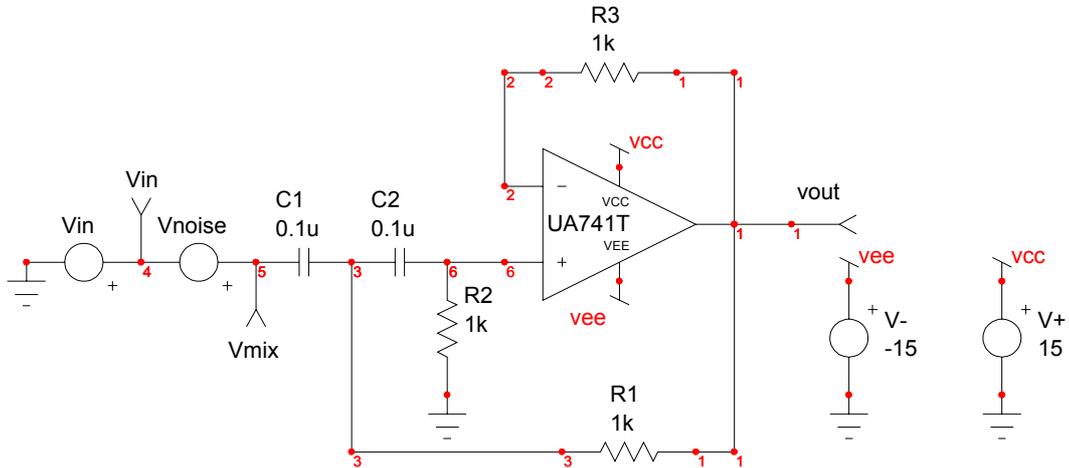


圖 6. 二階高通濾波器範例

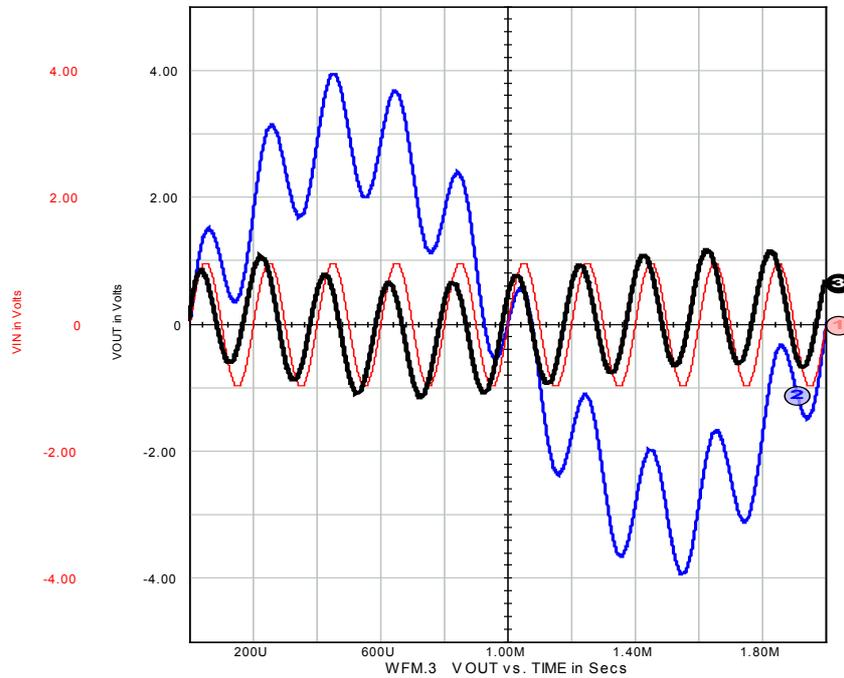


圖 7. 圖 6 濾波效果(1 :  $V_{in}$ 、2 :  $V_{mix}$ 、3 :  $V_{out}$ )

### 帶通濾波器(band pass filter)

帶通濾波器之用途是只使特定頻帶之訊號通過的電路。圖 8(a)為帶通濾波器的電路圖，這種濾波器在「共振頻率(resonant frequency), $f_r$ 」有最大輸出電壓  $V_{\max}$  或最大電壓增益  $A$ ，離開共振頻率則輸出電壓下降，朝兩邊降至  $0.707V_{\max}$  即為高位截止頻率  $f_h$  和低位截止頻率  $f_l$ ，在  $f_h$  和  $f_l$  的差值即為「頻帶寬(band width), $B$ 」， $f_r$  則位於  $f_h$  和  $f_l$  的幾何中心，如圖 8(b)所示

$$B = f_h - f_l \quad (\text{Hz}) \quad (3)$$

$$f_r = \sqrt{f_l f_h} \quad (\text{Hz}) \quad (4)$$

用來判斷自頻率中心向任一方移動時下墜陡緩程度因數稱為電路的「品質因數(quality factor), $Q$ 」，品質因數是共振頻率與頻帶寬的比例如式(5)，因此在相同共振頻率下，欲使頻帶寬愈狹窄，品質因數就要愈大。不過品質因數有一限制，必須大於增益一半的平方根，即  $\sqrt{\frac{A}{2}}$ ，例如若增益為 72，則品質因數就必須大於 6。

$$Q = \frac{f_r}{B} = \frac{f_r}{f_h - f_l} \quad (5)$$

$$B = \frac{f_r}{Q} \quad (6)$$

帶通濾波器設計者可先選擇共振頻率  $f_r$  和頻帶寬  $B$ ，然後由式(5)算出  $Q$ ，或先設計  $f_r$  和  $Q$ ，再由式(6)算出  $B$ ，有了  $Q$ 、 $B$  及  $A$  之後就可利用圖 8 的公式算出  $R_1$  及  $R_2$  及  $R_3$ 。

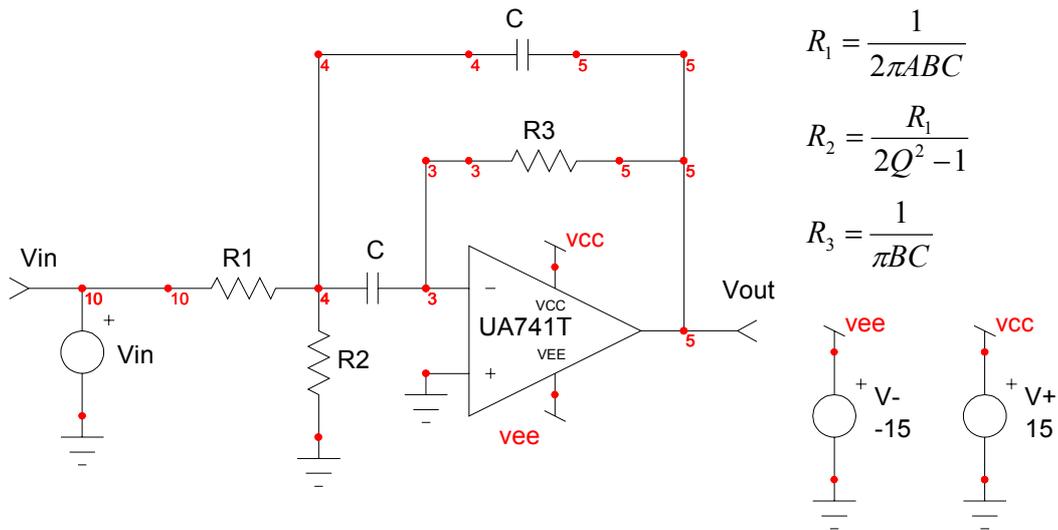


圖 8.(a) 帶通濾波器的電路圖(單增益)

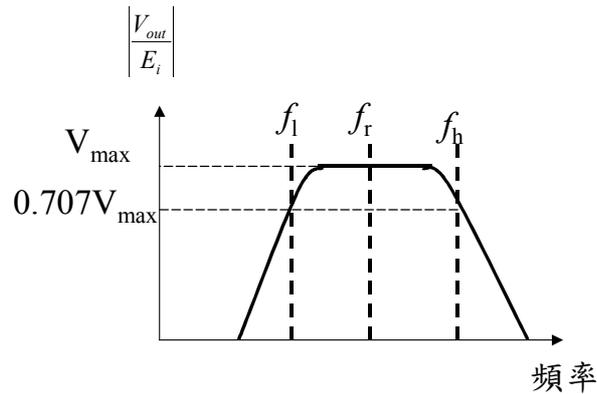


圖 8.(b) 帶通濾波器頻率響應圖

舉例說明，假設有一 10kHz 的訊號，伴隨 1kHz 之低頻雜訊及 100kHz 之高頻雜訊，應如何設計一個適合的帶通濾波器呢？

已知  $f_i=10k$ ，假設選定頻帶寬為 1kHz、增益=1，則  $B=1k$  由式(6)得知  $Q = \frac{f_r}{B} = 10$ 。

有了  $B$  和  $Q$  後，選用  $0.001 \mu$  的電容，就可以算出  $R_1 = \frac{1}{2\pi ABC} = 159230 \Omega \approx 160k \Omega$ 、

$R_2 = \frac{R_1}{2Q^2 - 1} \doteq 800\Omega$ ， $R_3 = \frac{1}{\pi BC} \doteq 320k\Omega$  以上規格確定後，即可製作出如圖 9 的帶通濾波器，其濾波效果如圖 10 所示。

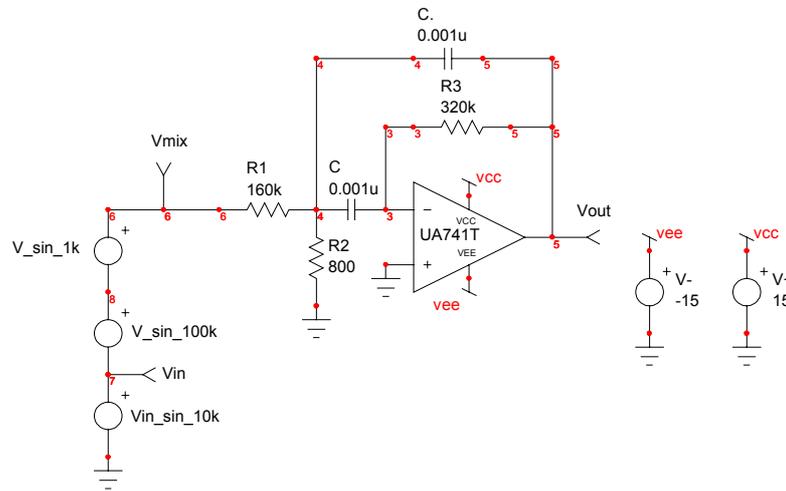


圖 9. 帶通濾波器

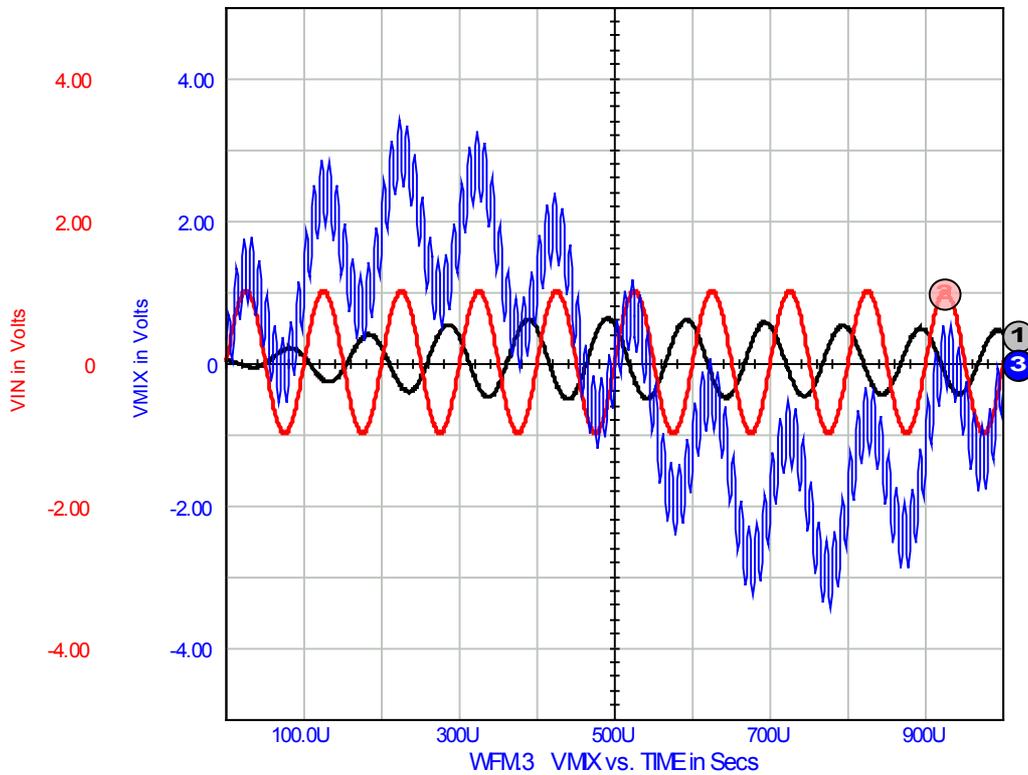


圖 10. 圖 9 濾波效果(1 :  $V_{out}$ 、2 :  $V_{in}$ 、3 :  $V_{mix}$ )

## 帶拒濾波器(band reject filter)

帶拒濾波器（又稱陷波、凹形）是用來衰減一個特別頻率的訊號的電路。增益在所有的頻率為 1，除了接近帶拒頻率外，可用於針對特別雜訊消除，如交流電源 60Hz 及其倍數，其頻率響應圖如圖 1(d)，圖 11 是一個 Wein 電橋類型的帶拒濾波器，其壓制頻率由式(7)之算式可得

$$f_n = \frac{1}{2\pi RC} \quad (7)$$

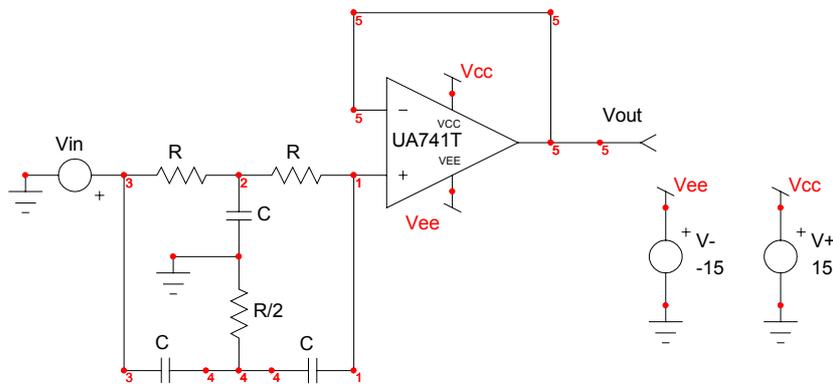


圖 11. Wein 電橋型帶拒濾波器

假設現在有一個 5Hz 的方波伴隨著 60Hz 雜訊，欲使用帶拒濾波器消除此雜訊，選用 0.1u 的電容，計算出  $R=26.5k\Omega$ ，以此規格製造出來的濾波器可有如圖 12 的濾波效果。

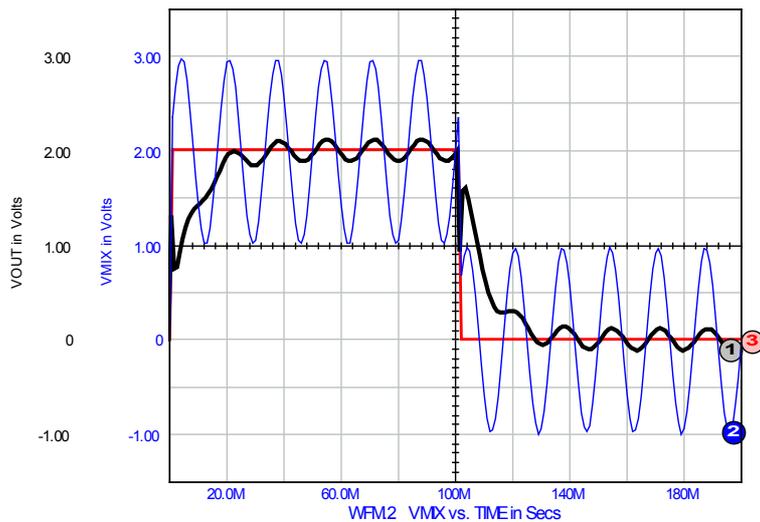


圖 12. 濾波效果(1 :  $V_{out}$ 、3 :  $V_{in}$ 、2 :  $V_{mix}$ )

### 參考文獻

“機械控制用感測器技術入門”，洪榮哲編譯，機械技術出版社，77年10月

“機電整合”，陳天青，廖信德、戴任詔譯，Christopjer T.Kilian 著，高立圖書有限公司，87年8月

“機電整合導論”，陳雙源等編著，東華書局，89年10月

“運算放大器與線性積體電路”，許虛超編譯，儒林圖書公司，77年四月

“活用運算放大器”，方志鵬編譯，儒林圖公司，76年12月

“運算放大器原理與應用”，張文恭、江昭皚譯，格致圖書公司，80年3月