

加速度計電路之設計及特性驗證

勞成崑(A8532149)

鄭萬隆(A8532143)

指導老師：王柏村

國立屏東科技大學

機械工程技術系

摘要

本專題旨再針對加速度計在做全頻率量測時，因為自身振動所造成之量測誤差，為了改善此誤差缺失，故製作一信號處理電路，進而去分析、驗證此電路之特性與正確性。首先以一電容式加速度計信號處理電路為藍本，去接至一電路模組，接至完成後再將電路模組和訊號產生器、電源供應器和示波器相連接，去比較驗證及特性，之後再將加速度計和信號處理電路結合，利用一標準振動源和激振器分別作為振動信號源，將兩組加速度計一起置於振動源上，分別作單頻振動和寬頻振動的驗證，並且將兩組加速度計的輸出端接至頻譜分析儀，將兩組偵測信號做比較，判斷信號處理電路是否有錯誤，並且求出加速度計之靈敏度。

一、前言

近年來，隨著工業製造品質的提升及產品精密度的要求；使得振動及噪音的問題逐漸被重視，其中微型加速度感測計（micro-accelerometer）為偵測振動源之感測原件，主要功能是測量出振動源產生之頻率及加速度值，將之轉換成適當的輸出信號或能量，由資料[1]，林容生的微型加速度計中得知由於積體電路製程，微加工與包裝技術的進步，使得以矽等半導

體材料為基礎的感知器的發展一日千里，這些微小的機電元件擁有許多傳統感知器所沒有的優點，如高可靠、高靈敏度等，並由資料[3]、[4]、[5]中電子電路設計及運算放大器手冊中得知各種基本電路之理論公式與原理，將之應用在所需的之信號處理電路中。

目前大多數的加速度計製造商皆有生產範圍廣大且多樣化的加速度計，再一開始看到這麼多種加速度計時，可能讓人覺得有些多的無從下手選擇的感覺，由資料[2]振動專題中，獲悉在加速度計的目錄中，有一些所謂的「一般用途」（general-purpose）型加速度計可符合大多數的量測需求，對於其他型式的加速度計則有他們自己的特性以適用於特殊的應用，例如：小尺寸的加速度計適用於高振動量、高頻率的量測，以及適用於較精緻的結構或面板等，其他適合特殊用途的加速度計有 X-Y-Z 三軸同時量測、高溫量測、極低振動量量測、高振動量陡振量測等各種特殊用途加速度計。

一般機械系統的震動能量通常在 10HZ - 100HZ 較窄的頻寬內，當我們在選用加速度計時，我們必須保證加速度計的有效頻率範圍（平坦的範圍）包含了我們所感興趣的頻率範圍，實際上加速度計的頻率下限位置是由兩個因素所

決定，其一是與加速度計連接的放大器的低頻截止頻率有關，另一個因素是加速度計對環境溫度擾動的敏感度，並且由於加速度計的共振使得再高頻時加速度計的靈敏度有增加的趨勢，因此在這些高頻範圍，加速度計無法給量測位置一個正確真實的輸出信號，此一問題的克服可以經由選擇一個頻率範圍很寬的加速度計與裝一個附屬於振動計與前置放大器的低通濾波器，藉此已去除因加速度共振所產生的信號。

本專題所研究製作方向，就是針對加速度計在做全頻率域振動量測時因加速度計共振所造成的量測誤差，因此製作一個加速度計信號處理電路，以及去分析此信號處理的特性及驗證正確與否，使的伺服控制所需信號回饋的誤差能減少至最低。

二、問題說明

2.1 電容式微加速度計

由於積體電路(integrated circuit)製程、微加工(micromachining)與包裝(packaging)技術的進步，使以矽等半導體材料為基礎的感知器度(半導體感知器)與致動器的發展一日千里。此外矽元素以已被廣泛地運用在半導體工業上，因為它具有極佳的電氣、機電及機械性質，可以用來作為製作積體電路、微結構、積體感知器等用途的材料。

感知器的基本功能是用以偵測輸入信號或能量並將之轉換成適當的輸出信號或能量，目前的微型加速度計有電容式(capacitive type)與壓阻式(piezoresistive type)兩種[1]，有別於傳統的壓式加速度計，本文所選用者為電容式加速度計，其構造如圖一。

其作用原理是質量塊由支撐梁支撐，上下為固不動的 Pyrex glass 包裝，其上布有電極，當質量塊受加速度作用而移動時，質量塊與上下電極板之間的距離改變而造成電容改變，藉此來量測加速度信號，其操作溫度範圍約為 $-55^{\circ}\text{C} \sim 125$

$^{\circ}\text{C}$ ，量測範圍從 $\pm 0.0001\text{g} \sim \pm 500\text{g}$ ，頻寬由 100Hz 到 2KHz 均有，其頻率響應曲線如圖二。

2.2 電容式加速度計之優缺點

目前常有的微型加速度計有電容式與壓阻式兩種，有別於傳統的壓電式加速計，但是如果壓電式加速度如果製成微型感知器，其靈敏將降低，故市面上並無此類產品；而壓阻式與電容式加速計，則有微型加速度計之產品，因本組專題所擁有的加速度計為電容式，所以就針對電容式加速度計做評比，電容式加速度計和其他加速度計之比較如表一。

優點：

- ①溫度靈敏度極小(一般約為 $\pm 0.02\%/^{\circ}\text{C}$)，因此電容式加速度計不太需要溫度補償的電路。
- ②電容式加速度計具備量測等加速度信號的能力與低頻響應。
- ③具有相當高的靈敏度與解析度，特別適合於低振動量的信號量測。

缺點：

- ①高阻抗的特性使輸出信號易受雜訊干擾，如連接信號線的電容，在低振動量測時必須特別小心，所以通常需要額外的電子電路將輸出信號轉變成低阻抗信號。
- ②電容本身對電極板距離的非線性，故在量測上必須配合電子電路，如圖三使之線性化， $C = kA/d(k=0.0885 \epsilon)$

d = 電極板距離(cm)

A = 電極板面積(cm^2)

ϵ = 介電常數

所以量測應用上必須配合電子電路使其線性化。

- ③信號處理電路是最複雜的。

信號處理電路所用的材料：

- (1) LM324IC 一個
- (2) 100 歐姆電阻 8 個
- (3) 5000 歐姆電阻一個

- (4) 2.2 次微米法拉第電容一個
- (5) 二極體兩個
- (6) 電晶體一個

三、電路分析

爲了消除電容式加速度計高阻抗使輸出信號易受雜訊干擾，並且電容本身對電極板距離的非線性這二大特性，所以量測上必須配合電子電路使用，如圖三，以確保量測值有較高的精確度，此訊號處理電路包含了運算放大器、反相放大器、變動放大器、電壓隨耦器、濾波器。

3.1 運算放大器 (Operational amplifier)

運算放大器(op amps)是一種線性 IC 如圖四，而圖五爲其符號圖，它可以用來放大頻率從 0Hz 至超過 1MHz 之直流或交流信號，還會放大二輸入信號的差值，因而排斥或嚴重衰減在二輸入端的共同信號，以致它可在有大量雜訊的電子系統中使用。

運算放大器之特性

運算放大器有下列幾點特性：

- (1) 輸入阻抗愈高、運算放大器愈好。
- (2) 非常高的開路增益。
- (3) 輸出阻抗愈低愈好，且由於高輸入阻抗和低輸出阻抗，可以讓運算放大器成爲阻抗匹配裝置。
- (4) 運算放大器也會受溫度影響。
- (5) 當運算放大器頻率增加時，增益會減少，如圖六所示。
- (6) 運算放大器和其他的電子電路一樣易受雜訊干擾，但是雜訊會被放大，可用一個小電容器 (=3PF) 來旁路回授電阻以在高頻減少雜訊增益。
- (7) 運算放大器利用一電晶體作爲短路保護裝置。
- (8) 運算放大器在操作時需要一對稱的正、負電源，一些特殊的運算放大器設計成使用單一電源 (通常正電源) 標準的運算放大器在使用單一電壓有些限制，例如靜止狀態輸出必須調整爲約最

大供應電壓與地間電壓的一半。

3.2 反相放大器 (inverting)

反相器如圖七，爲一具有負回授之 op-amp 電路，因爲 V_{in} 放運算放大器的反相(-)輸入端所以產生 180° 。

反相放大器電路之理論依據公式爲

$$\text{輸出電壓： } V_{OUT} = A_v V_{in} \quad (1)$$

$$\text{增益公式： } A_v = \frac{-R_f}{R_{in}} \quad (2)$$

反相放大器閉路增益因素 (gain factor) :

$$A_v = \frac{-R_f}{R_{in}}$$

輸入阻抗： $Z_{in}=R_{in}$ (因反相輸入端爲虛接地)

$$\text{輸出阻抗： } Z_{out(CL)} = \frac{Z_{out(OL)}}{1 + A_{vol} \beta}$$

$$\beta = \frac{R_i}{R_i + R_f} \quad (3)$$

β 稱爲回授分數(feedback fraction)它會決定有多少輸出信號會回授到輸入端。

3.3 差動放大器

差動放大器如圖八，爲具有放大差類輸入信號，但拒斥或衰減共模輸入信號能力的電路，差動放大器常與橋式電阻電路結合使用，橋式電路的輸出即爲差動放大器的輸入。

差動放大器電路之理論依據公式爲利用重疊原理推導出電壓 V_{out} 首先假設 V_Y 短路，

$$\text{輸出電壓： } V_{out} = -\frac{R_f}{R_i} V_X (V_Y \text{ 短路})$$

當輸入 V_X 短路，放大器爲非反相組態，輸出電

$$\text{壓： } V_{out} = \frac{R_3 V_Y}{R_2 + R_3} \times \frac{R_f + R_1}{R_1} (V_X \text{ 短路})$$

$R_1=R_2$ 及 $R_f=R_3$ 可得

$$V_{out} = -\frac{R_F}{R_1}(V_x - V_y) \quad (4)$$

3.3 電壓隨耦器(Voltage follower)

電壓隨耦器如圖九所示，就是一種單位增益放大器(unit gain amplifier)其目的就是要讓輸出電壓必須追隨輸出電壓，為的就是要讓電路能夠緩衝或隔離電壓源 V_{in} 與低阻抗負載，使得運算放大器可以消除任何的負載效果發生。原理是因為輸入電壓 V_{in} 是直接加在運算放大器之非反相較(+)輸入端，也因為如此，輸入與輸出電壓同相位，並且輸出端直接接在反相(-)輸入端，所以差額輸出壓 $V_{out} \approx 0V$ ，因此：

$$V_{out} \equiv V_{in}$$

因此閉迴路電壓增益：

$$A_{cl} \equiv \frac{V_{out}}{V_{in}} \equiv 1 \quad (5)$$

3.5 濾波器(filter)

3.5.1 主動低通濾波器

主動低通濾波器如圖十所示，就使直流電路在特別的截止頻率(cutoff frequency)具有固定的輸出電壓，而這截止頻率： f_c ，又稱 0.707 頻率、-3db 頻率、轉角頻率 (corner frequency)，或是斷點頻率 (breakpoint frequency)，也就是說超過 f_c 之頻率將會衰減。圖十一所示為頻率響應曲線。

截止頻率 f_c 之理論公式為

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (6)$$

3.5.2 主動高通濾波器

高通濾波器如圖十二所示，它的功能剛好與低通濾波器相反，它主要是衰減一個特殊頻率 f_c 以下的所有頻率而讓 f_c 以上的頻頻率通過，圖十三為其頻率響應曲線。

四、實驗過程

本專題所設計製作之電路為 3022 型加速度計用之信號處理電路，因為電容是加速度計高阻抗的特性使輸出信號易受雜訊干擾及電容本身對電極板距離的非線性，所以此訊號處理電路具有減少雜訊和使輸出訊號線性化的功能，並且具有因為溫度升降而誤乘量測誤差之溫度補償特性。

4.1 電路驗證

當信號處理電路設計製作完成後，必須驗證電路是否正確及符合需求，若電子電路接製錯誤或是阻抗、雜訊太高，皆會造成量測輸出信號失真甚至量測不到，故最後尚需檢驗電路的線性度、放大倍率、適用頻率範圍、輸入與輸出的轉換關係等，以確保加速度計的量測值能夠準確零誤差。

造成電路雜訊的原因：

- ① IC 及電線本身的潛在電容及電阻。
- ② 接線之長短及彎折情形。
- ③ 電路之接地迴路。
- ④ 無良好包覆的電纜引起之線路雜訊。
- ⑤ AC 或 DC 電壓量測值的誤差。
- ⑥ 測試時的安裝不良或不當使用。

電路驗證的方法為將信號處理電路獨立出來，利用訊號產生器所輸出之信號當程式加速度計所偵測到的振動信號，並且將電子電路之輸出端接至示波器上，觀察輸入與輸出信號波型是否正確、合理，圖十四為電路系統驗證圖。

4.2 加速度計之驗證

幾乎所有的加速度計均可視為一個單自由度機械系統的类型，而由質量塊、彈簧及支撐結構所構成，如果每一個加速度計的設計、製造及校準過程均正確，那麼加速度計應該要有一個清楚且易辨別的固有頻率或平直的頻率響應，加速度計校正分為二方面，一為單頻率信號的驗證、另一為寬頻信號的驗證

加速度單頻系統驗證，是將自行製作之加速度計模組和一標準加速度計放在一標準振動源

上，由二組加速度計所偵測到的信號分別傳送到頻譜分析儀進行信號分析，將二者之結果作比較，以驗證信號處理電路是否正確，其系統驗證圖如圖十四。

加速度計寬頻系統驗證，是將自行製作之加速度計和標準之加速度計一同放置於一激振器上，二者共同偵測由激振器所產生之信號，並將二組加速度計所偵測到之信號傳送至頻譜分析儀上，二者進行比對，以驗證信號處理電路是否正確，其系統驗證圖如圖十五。

校正項目

(a)靈敏度測試

電的輸出與機械力的比值稱靈敏度，加速度計的輸出通常以電壓（或電荷）每單位動力加速度來表示，靈敏度通常是在使用正弦波的振源產生頻率之下所得到的。

靈敏度的求法為經由加速度計偵測到之訊號輸出值轉換為電壓，和每單位動力的加速度之比值稱為靈敏度。

$$\text{靈敏度}(S) = \frac{\text{訊號輸出電壓值}}{\text{振動源加速度值}} \quad (7)$$

(b)頻率響應測試

頻率響應是指加速度計在幾個頻率範圍內，所量得的對應某個參考頻率點之輸出。

(c)共振頻率測試

此項量測的目的在測出加速度計的共振或固有頻率。

(d)線性度測試

線性量測是在校正起過一特殊範圍之下，用增加或減少機械輸入方式輸入信號至加速度計，並記錄其輸出值。

對感知元件或量測儀器而言，校正是對待測件施以一個外加的刺激，量測並記錄其偏差值，依規範作調整等三步驟。

步驟一：

將待測元件或儀器和一已知的信號源連

接，此信號源係經過精密校正或輸出值能夠以絕對方式且準確得到者。

步驟二：

記錄待測元件的輸出，並將其測值與參考加速度所得值做比較，並將任何偏差值記錄下來。

步驟三：

依校正程序做調整，使指示的輸出（待校件的輸出）能符合或至少與已知值（參考加速度計讀值）做適當的比對。

加速度單頻系統驗證，是將自行製作之加速度計模組放在一標準振動源上，而加速度計所偵測到的信號經由電子電路處理後，在傳送到頻譜分析儀進行信號分析。

加速度計寬頻系統驗證，是將自行製作之加速度計和標準之加速度計一同放置於一激振器上，二者共同偵測由激振器所產生之信號，並將二組加速度計所偵測到之信號傳送至頻譜分析儀上，二者進行比對，以驗證信號處理電路是否正確。

五、結果與討論

5.1 電路驗證

為了驗證信號處理電路的使用可靠性，在電子電路製作完畢後，必須驗證電子電路之穩定性、放大倍率、輸入與輸出信號關係、可量測信號的頻率範圍。

正弦波信號適用頻率範圍為 700HZ—9KHZ，經過測試後發現若超過此頻率範圍則輸出信號波形被扭曲，而在此頻率範圍內輸入和輸出信號波形的比例關係為 2:1，輸出信號被減少一半，輸出與輸入關係如表二。

方波信號適用頻率範圍為 700HZ—2KHZ，經過測試後發現若超過此頻率範圍則輸出信號波形被扭曲，而在此頻率範圍內輸入和輸出信號波形的比例關係為 2:1，輸出信號被減少一半，輸出與輸入關係如表三。

三角波信號適用頻率範圍為 800HZ—7KHZ，經過測試後發現若超過此頻率範圍則輸出信號波形被扭曲，而在此頻率範圍內輸入和輸出信號波形的比例關係為 2:1，輸出信號被減少

一半，輸出與輸入關係如表四。

5.2 加速度計驗證

a 加速度計單頻率驗證

在信號處理電路測試時，因為所實驗出來的結果顯示加速度計和信號處理電路相結合使用時，其所能偵測的頻率範圍為 700HZ-9KHZ 之間，但是標準振動源的振動頻率為一平穩的正弦信號，頻率為 159.2HZ，故加速度計偵測不到此信號。

b. 加速度計寬頻率驗證

加速度計寬頻率振動信號測試，是由一激振器所產生之振動源，由標準加速度計和自行製作之加速度計模組共同測試，偵測到之信號一起輸入 BK3550 型頻譜分析儀去比較，輸入模組 A 為標準加速度計，輸入模組 B 為自行製作之加速度計。因為信號處理電路的可用頻寬為 700-9KHZ，且 3022 型電容式加速度計可用頻率範圍為 0-1000HZ，故本文所要探討之隨機訊號為帶頻 (band pass) 隨機訊號。所謂帶頻隨機訊號是只指頻率域下某個頻率區間之訊號，其餘的訊號濾掉，本文之單頻率設定為 852HZ，如圖十七，而帶頻設定有二：一為帶頻 800HZ，而中心頻率為 1200HZ，如圖十八，令另一帶頻 200HZ，中心頻率為 900HZ，如圖十九。

由圖十七可發現，當激振器輸入一 852HZ 單頻訊號時，由輸入模組 A 所偵測到的信號為在 852H 處有一 18.2m/s^2 之加速度值，而由輸入模組 B 所偵測到的信號為在 852H 處也有一 18.2m/s^2 之加速度值，不過由模組 B 的偵測結果可知，有許多的 60HZ 雜訊存在。

由圖十八可發現，當激振器輸入一振動訊號時，由標準加速度計 (輸入模組 A) 所偵測到的信號為在 852HZ 處，有一 1.25m/s^2 之加速度值存在，而在 1300HZ 處，有一波形凸起現象，此現象不是由雜訊所造成的，而是因為標準加速度計放置在自行製作的加速度計上，形成一彈簧振子系統所造成的，不過 700HZ 以下的訊號卻被衰減和信號處理電路之適用頻率範圍一樣。而由自

行製作的加速度計 (輸入模組 B) 所偵測到之信號為在 852HZ 處也有一 1.24m/s^2 之加速度值，可知自行製作的加速度計零敏感度為 $269\mu\text{v/ms}^2$ ，不過卻有 60HZ 的雜訊存在。

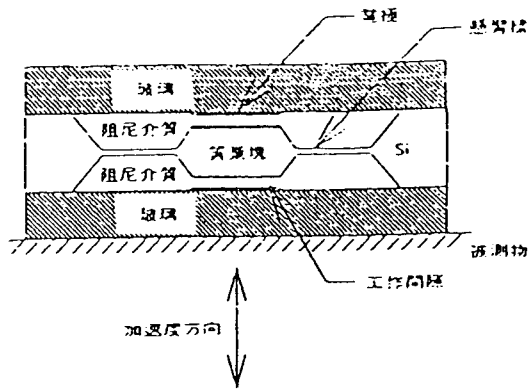
由圖十九可發現，當激振器輸入一振動訊號時，由標準加速度計 (輸入模組 A) 所偵測到的信號為在 852HZ 處，有一 4.65m/s^2 之加速度值存在，而由輸入模組 B 所偵測到之信號為在 852HZ 處有一 4.66m/s^2 之加速度值，可知自行製作的加速度計零敏感度為 $345\mu\text{v/ms}^2$ ，不過卻依然有 60HZ 的雜訊存在。

六. 結論

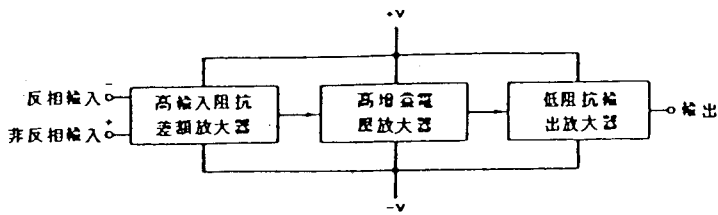
本文中所探討之加速度計信號處理電路為修正機械式感測元件偵測誤差之重要系統，對於大部分的加速度計校正系統而言，在良好的激振器何和週邊電路配合使用下，藉由使用設計良好和特性良好的標準加速度計可以使實際取得零敏感度的不準確度在 2-10% 之間。而自行製作之加速度計和標準加速度計使用的最大差異在於信號處理電路中存在有一 60HZ 的雜訊，故對於消除電子電路中的雜訊為電路設計製作者重要的課題。

七、參考文獻

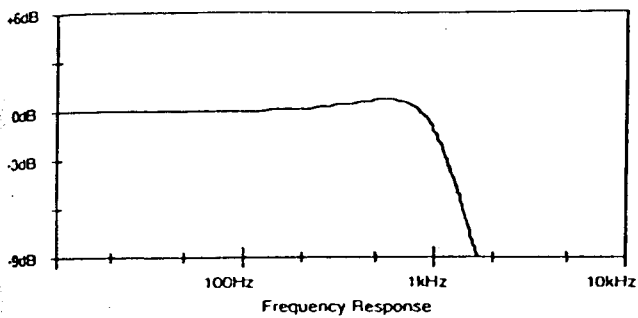
1. 林容生，"微型加速度計簡介"，機械月刊，VOL.11，PP.260-266，1996。
2. 陳興，"振動量測"，機械月刊，VOL.11，PP.200-209，1995。
3. 蔡忠良，郭有順，余永平，"電子學地第二版"，P.461，P.476，高立書局，台北，1996。
4. 歐福源，劉良俊，"運算放大器手冊"，PP.2-5，PP.10-11，P.35，PP.66-67，PP.69-70，全華書局，台北，1991。
5. 尤志賢，吳德龍，"電子電路設計"，PP.323-328，P.331，PP.335-337，PP.361-367，PP.376-384，PP.385-392，全華書局，台北，1990。



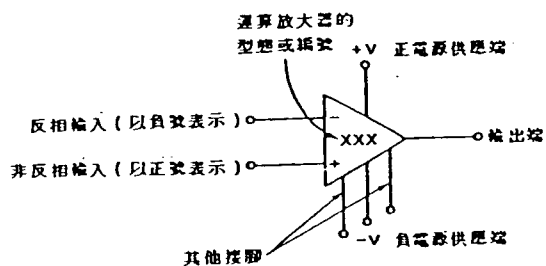
圖一 加速度計內部構造圖[1]



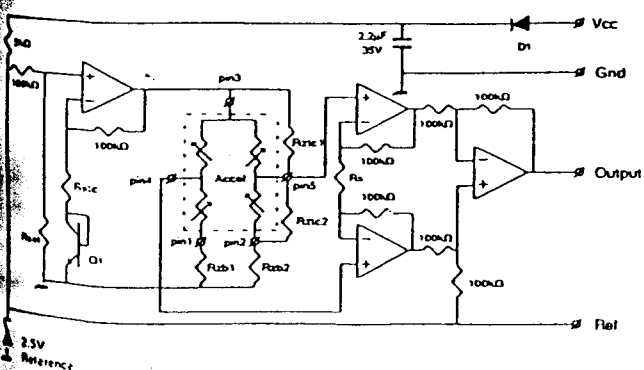
圖四 運算放大器 IC 示意圖[3]



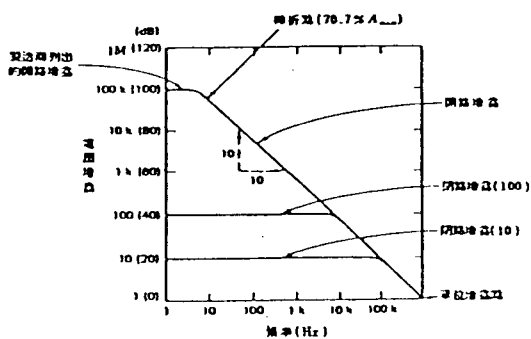
圖二 頻率響應曲線圖[2]



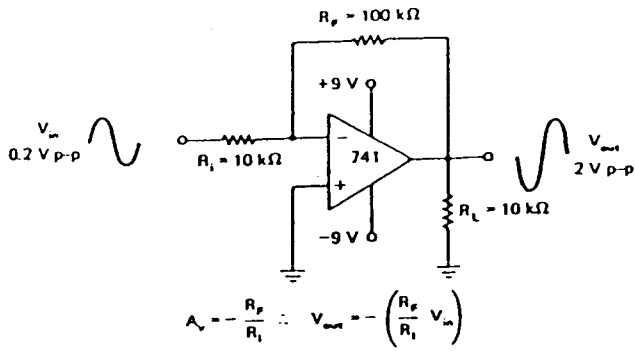
圖五 運算放大器符號圖[3]



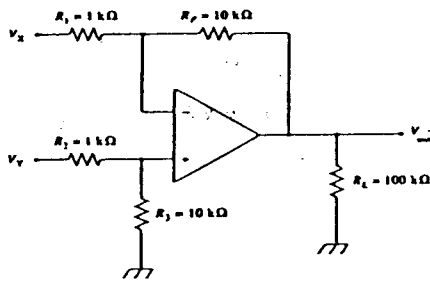
圖三 信號處理電路圖[2]



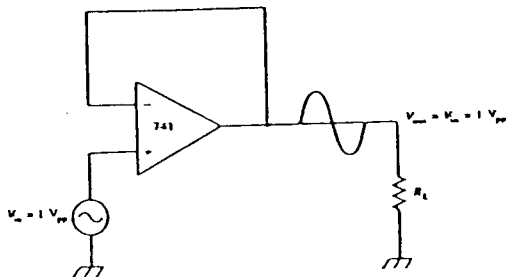
圖六 電壓增益對頻率響應圖[3]



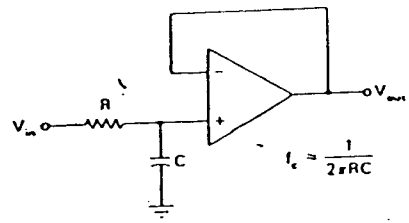
圖七 反相放大器示意圖[3]



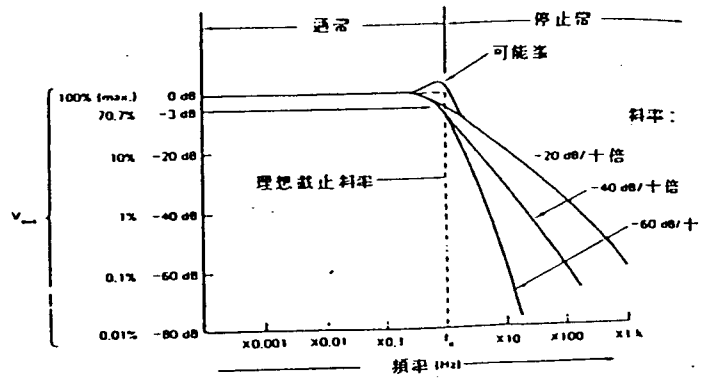
圖八 差動放大器示意圖[4]



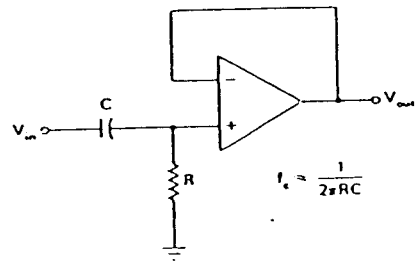
圖九 電壓隨耦器示意圖[4]



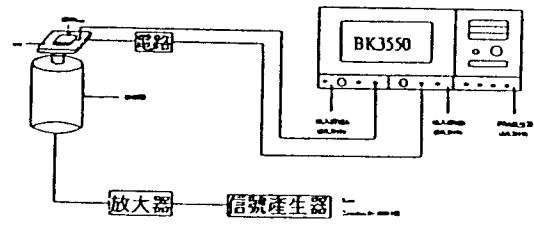
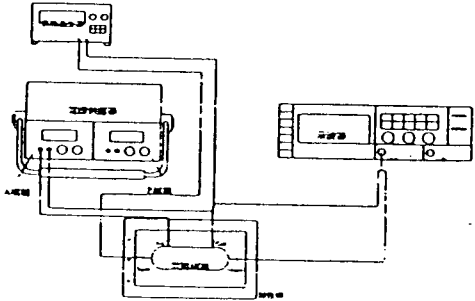
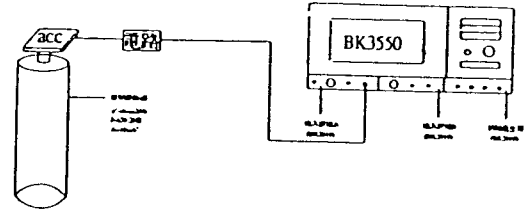
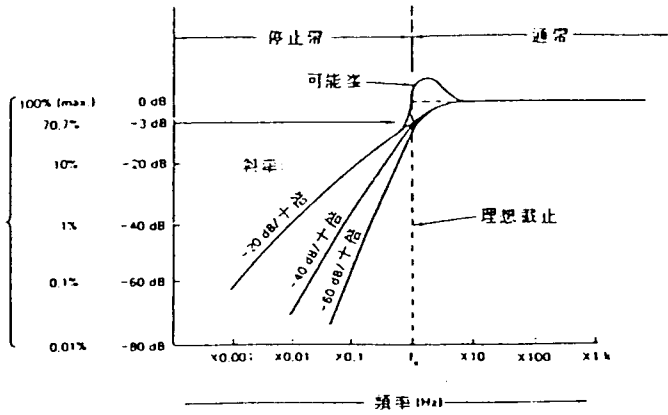
圖十 主動低通濾波器示意圖[3]

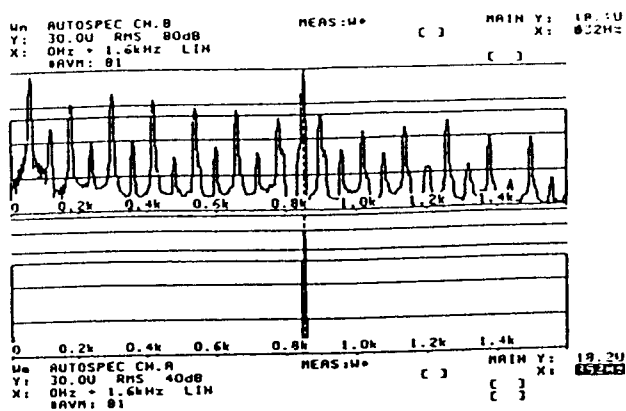


圖十一 主動低通濾波器頻率響應曲線圖[3]

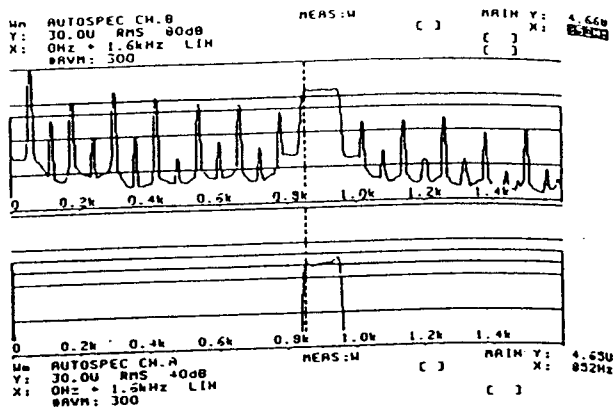


圖十二 主動高通濾波器示意圖[3]

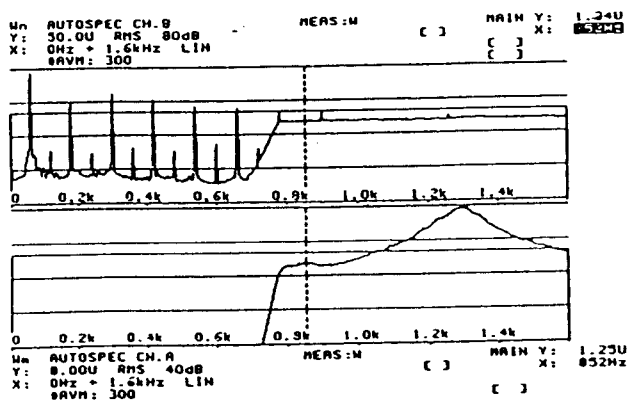




圖十七 加速度計單頻隨機訊號驗證設定圖



圖十九 加速度計帶頻隨機訊號驗證設定圖



圖十八 加速度計帶頻隨機訊號驗證設定圖

表一 與壓阻式壓電式加速度計之比較[1]

	壓電式	壓阻式	電容式
量測範圍	相當高	低	低
頻寬	寬	中	中
等加速度度 信量測能力	無	有	有
靈敏度	低	中	高
側向靈敏度	大	低	低
非線性度	小	小	大
阻抗	高	低	高
溫度靈敏度 係數	大	大	低
操作溫度範圍	非常寬	中	寬
額外處理電 路	需(複雜)	不需(簡 單)	需(較複 雜)
價格	高	低	中

表三 方波電壓輸入與輸出關係

輸入電壓	輸出電壓
3V	1.5V
6V	3V
9V	4.5V
12V	6V
15V	7.5V
15V 以上，波型被扭曲	

表二 正弦波電壓輸入與輸出關係

輸入電壓	輸出電壓
3V	1.5V
6V	3V
9V	4.5V
12V	6V
15V	7.5V
15V 以上，波型被扭曲	

表四 三角波電壓輸入與輸出關係

輸入電壓	輸出電壓
3V	1.5V
6V	3V
9V	4.5V
12V	6V
15V	7.5V
15V 以上，波型被扭曲	