

壓電薄膜加速度微感測器之系統模擬分析

藍慶斌

余志成*

國立台灣科技大學 機械工程研究所

摘要

本文旨在建立壓電薄膜加速度微感測器之機電系統模式，藉以分析微感測器之設計重點。文中首先推導典型加速度感測器之系統模式，進而以懸樑型為例，分析微結構的動態特性與壓電薄膜之電性反應，探討各參數間之互動與輸出特性之關係。本文並應用有限元素分析軟體 ANSYS，分析加速度感測器微結構之自然頻率及輸出響應，以驗證所推導之理論模式。

關鍵字： 微機電、壓感測器、加速度計、系統模擬

1. 研究背景

近幾年來，隨著各種電子商品與機械元件的微型化，微機電系統（Micro Electro Mechanical System, MEMS）衍然已成為熱門的研究課題。其中微感測器是在微機電系統中最早被商品化的產品，而且更是機電整合中不可或缺的一環。大部份的微感測元件係利用矽微細加工（Silicon micromachining）技術在矽晶圓（Silicon wafer）上製作出三次元的微結構，如：懸樑（Cantilever beam）、橋（Bridge）、隔膜（Diaphragm）、齒輪（Gear）等結構。然而若將這些微結構及具有換能功能的材料（如壓電薄膜）與微電子電路整合在同一晶片上，則可製作成微型的感測器。微感測器除了較傳統感測器可更精確地量測與控制外，由於製程技術與製作積體電路製程的相容性極高，因此便於大量地製造以降低成本。

壓電陶瓷材料具有機械能與電能之間的轉換特性。一般常用的壓電材料如銦鈦酸鉛（ $PbZr_xTi_{1-x}O_3$ ，PZT），由於具有高機電耦合係數、高電阻抗、高驅動電壓及溫度穩定性等優點，已廣泛地應用在微感測器中，如微加速度計（Microaccelerometer）、聲波感測器（Acoustic Sensor）、紅外線檢測器（Infrared Detector）、微致動閥（Microvalve）及微泵（Micropump）等[1]。另一方面，壓電材料薄膜化除保有塊材的壓電特性外，更具有低成本的優點，而隨著陶瓷材料薄膜化的技術快速發展，提高了壓電薄膜的品質，在各種微感測器及微致動器的

應用上，具有相當的潛力[2]。

大多的文獻著重於微感測元件製造技術的探討[3-5]。而在元件系統分析與模擬上則較有限。其中部分研究[6,7]針對薄膜在彈性元件上受到彎曲力矩、側向剪力、軸向剪力時的靜態與動態壓電特性進行有限元素分析。此外，更有研究針對加速度微感測器之機械結構進行靜態與動態行為分析[8]。Nemirovsky 等[13]利用壓電薄膜進行壓縮視為加速度計的設計。然而對於應用壓電薄膜於微感測器的機電系統模式分析研究則較為有限，本文將以加速度感測器為應用載具，分析微結構與壓電薄膜的動態特性，進而建立懸樑型加速度微感測器的機電系統模式，作為未來設計分析的參考。

2. 感測原理

感測器是一種用來檢測、量度或紀錄某些物理量變化的情況，它所產生的反應可以用來傳輸資訊、啟動或操作控制系統之元件。基本上它必須和其他電路元件組合成為轉換器（Transducer），以將某種形式的能量轉換成另一種形式的能量輸出。在眾多感測器類型中，機械感測器由於應用上之普及，佔所有感測器中最大的類別。機械感測器主要用以量測機械物理量，包括力量（扭力）、應力（壓力）、應變、位移、速度及加速度等。這些物理量造成感測元件的微結構的變形（deflection），而變形往往與所施予的刺激量呈正比，再藉由量測應

* 聯絡作者

變、電容或光學干涉的轉換元件將這些變形轉換成電子訊號輸出。

以加速度微感測器而言，若以能量傳遞的方式來細分，可略分成壓阻式 (Piezoresistive) [9]、電容式 (Capacitive) [10,11]及壓電式 (Piezoelectric) [12] 等三種。在加速度微感測器之發展中，一開始主要集中在壓阻式加速度微感測器，其機械結構係以懸樑來支撐振動質塊，利用振動質塊受加速度作用，致使懸樑彎曲變形造成其上的壓阻變化而感測加速度的大小，如圖 一(a)所示。然而由於壓阻式加速度微感測器易受溫度之影響，所以在較高精度的加速度微感測器則以電容式加速度微感測器為主。其機械結構係以懸樑來支撐振動質塊，在振動質塊面上及基座面上各有一電極，而形成一個平行板式的電容器，如圖 一(b)所示。當受到加速度作用時，將改變振動質塊與基座間之距離，利用電容之變化轉換成電壓輸出之變化而感測加速度之大小。而壓電式加速度微感測器之機械結構基本上與壓阻式相似，它主要是利用壓電材料的壓電效應來感測加速度之大小，如圖 一(c)所示，具有高溫度穩定性與高敏感度等優點。上述任一種感測方式都各有其優缺點，而沒有一種感測方式可結合所有的優點，以量測所有情況下之加速度。

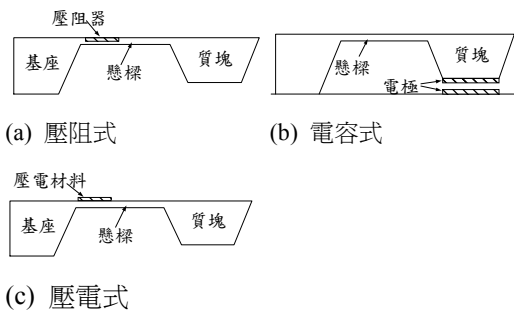


圖 一 加速度微感測器的基本結構

3. 典型加速度感測器之系統模式

一般而言，典型加速度感測器之機械模式可由質量-彈簧-阻尼系統來表示，如圖 二。它是在感測器本體內，由一個剛性係數為 K 的彈簧及阻尼係數為 B 的阻尼來支撐著振動質塊 M 所組成的機械系統。若將感測器本體固定在受測的移動件上時，則可用以量測位移、速度或加速度等物理量。

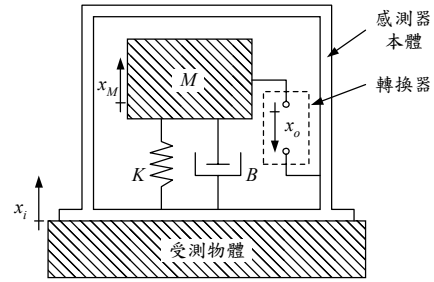


圖 二 典型加速度感測器之機械模式

假設感測器本體之絕對位移為 x_i ，其加速度為 \ddot{x}_i ，也就是我們所欲量測的物理量；而振動質塊 M 的絕對位移為 x_M ；振動質塊和本體之間的相對位移為 x_o ，即

$$x_o = x_i - x_M \quad (1)$$

根據牛頓第二定律 (Newton's Second Law) 可得到質量 M 在微小的變動下之運動方程式為：

$$M\ddot{x}_M = B\dot{x}_o + Kx_o \quad (2)$$

所以，此系統之運動方程式為：

$$M\ddot{x}_i = M\ddot{x}_o + B\dot{x}_o + Kx_o \quad (3)$$

由(3)式可知，加速度 \ddot{x}_i 僅為 x_o 之函數。

加速度感測器之感測原理為當感測器本體受到一加速度 \ddot{x}_i 時，將造成振動質塊 M 和感測器本體間的相對位移 x_o 。若在振動質塊與本體間置入一壓電材料作為轉換器，藉由材料之壓電效應，則可以得到一個電量變化。由於涉及機電能量之轉換，因此在分析此系統時，將分成機械轉移函數及電性轉移函數兩部份：(1)機械轉移函數， G_m ，主要是給定振動質塊和感測器本體間的相對位移 x_o 與加速度 \ddot{x}_i 的關係。(2)電性轉移函數， G_e ，主要是給定感測器輸出電壓 e_o 與振動質塊和感測器本體間的相對位移 x_o 的關係。

加速度感測器整體的轉移函數 T 等於此二轉移函數的乘積。

$$T = G_m \cdot G_e \quad (4)$$

3.1 機械轉移函數

將振動質塊和本體的相對位移 x_o 與加速度 \ddot{x}_i

之比率定義為機械轉移函數。並且假設起始條件為零（ $x_o(0)=0$ 及 $\dot{x}_o(0)=0$ ），則(3)式的系統轉移函數如下：

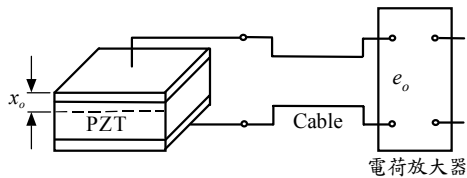
$$\frac{x_o(D)}{\ddot{x}_i} = S_m \cdot \frac{w_n^2}{D^2 + 2\zeta w_n D + w_n^2} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } w_n &= \sqrt{\frac{K}{M}} && \text{自然頻率} \\ \zeta &= \frac{B}{2\sqrt{KM}} && \text{阻尼比} \\ S_m &\equiv \frac{M}{K} && \text{機械敏感度} \end{aligned}$$

由上述方程式可以看出，機械的自然頻率正比於彈簧剛性 K 而反比於振動質塊的質量 M 。相反地，機械敏感度 S_m 是正比於振動質塊的質量 M 而反比於彈簧剛性 K 。明顯地，雖然增加機械的自然頻率可使得工作頻寬增大，但相對的會減少機械敏感度。因此，在設計時二者需作一權衡考量。

3.2 電性轉移函數

輸出電壓 e_o 與振動質塊和本體間的相對位移 x_o 之比率定義為電性轉移函數。最簡單的設計即是在振動質塊與感測器本體間置入一壓電轉換器系統（如圖三），以作為機電能量的轉換。壓電轉換系統包括：壓電轉換元件器（PZT transducer）、連接線路（Cable）及電荷放大器（Charge amplifier）等元件。在應用上為了防止轉換器在靜態變形時的電荷洩漏，轉換器本身的阻抗通常是很高的，而且放大器也是採用高阻抗的型式。另外，當連接線路很長時，必須考慮線路電容之影響，尤其是在低頻應用。



圖三 壓電轉換器系統

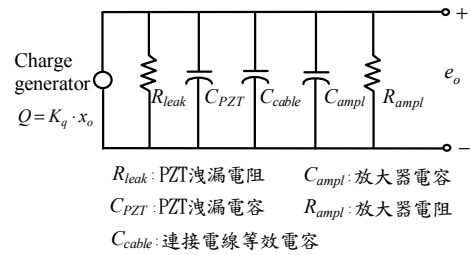
當 PZT 受到單方向的壓縮或拉伸時，所產生的電荷可以表示成：

$$Q = K_q \cdot x_o \quad (6)$$

K_q 為單位變形所產生之電荷

x_o 為 PZT 變形量，即振動質塊與感測器本體間的相對位移

壓電轉換器係利用壓電元件將機械的運動轉換為電訊號輸出，因此可將其視為一個電荷產生器（Charge generator），圖四為壓電轉換器之相當電路圖，若結合其電阻(7)式及電容(8)式可得圖五所示之等效電路。其中 PZT 洩漏電容 $C_{PZT} = \epsilon \cdot \frac{A}{h_p}$ ， ϵ 、 A 及 h_p 分別為 PZT 層之介電常數、表面積及厚度。

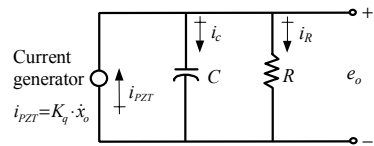


圖四 壓電轉換器之電路圖

一般 R_{leak} 甚大於 R_{ampl} ，所以

$$R \equiv \frac{R_{ampl} R_{leak}}{R_{ampl} + R_{leak}} \approx R_{ampl} \quad (7)$$

$$C \equiv C_{PZT} + C_{cable} + C_{ampl} \quad (8)$$



圖五 壓電轉換器之等效電路圖

$$i_{PZT} = \frac{dQ}{dt} = K_q \cdot \left(\frac{dx_o}{dt} \right) \quad (9)$$

$$i_{PZT} = i_c + i_R \quad (10)$$

$$e_o = e_c = \frac{\int i_c dt}{C} = \frac{\int (i_{PZT} - i_R) dt}{C} \quad (11)$$

$$\dot{e}_o = \frac{K_q}{C} \dot{x}_o - \frac{e_o}{\tau} \quad (12)$$

其中 $\tau \equiv RC$ 時間常數

所以，電性轉移函數可以表示為：

$$\frac{e_o(D)}{x_o} = S_e \cdot \frac{\tau D}{\tau D + 1} \quad (13)$$

其中 $S_e \equiv \frac{K_q}{C}$ $S_e \equiv \frac{K_q}{C}$ 電性敏感度

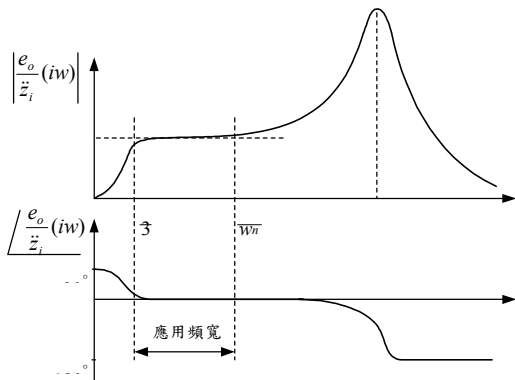
3.3 系統轉移函數

感測器系統的整體轉移函數結合機械轉移函數與電性轉移函數，將(13)式代入(5)式：

$$\frac{e_o(D)}{\ddot{x}_i} = S \cdot \frac{\tau D}{\tau D + 1} \cdot \frac{w_n^2}{D^2 + 2\zeta w_n D + w_n^2} \quad (14)$$

其中 $S \equiv S_e \cdot S_m = \frac{K_q}{C} \cdot \frac{M}{K}$ 敏感度 (Sensitivity)

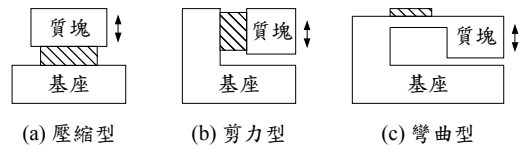
壓電式加速度感測元件之頻率響應若以 5% 作為容差時，則應用頻寬介於 $3/\tau$ 與 $w_n/5$ 之間，如圖六所示。低頻響應主要受限於壓電轉換元件中放大電路介面的時間常數 τ ，通常可藉由高阻抗的電壓或電荷放大器來改善；而高頻響應則受限於機械系統設計之固有共振頻率 w_n 。整個加速度感測器的敏感度主要受到材料壓電特性和放大電路介面 K_q/C 及機械結構設計 M/K 所控制。另外，在元件製造上無法避免的誤差，也會影響加速度感測器的準確性。未來在感測元件設計上也應一併考慮這些問題。



圖六 加速度感測器之頻率響應

以壓電式加速度感測器而言，感測類型一般可分為三類，包括：壓縮型 (Compression mode)、剪力型 (Shear mode) 及彎曲型 (Bending mode) 或稱為懸樑型 (Cantilever mode) 等，而其構造之示意圖如圖七所示。在下面的章節將探討懸樑型加速度微

感測器之系統模式。

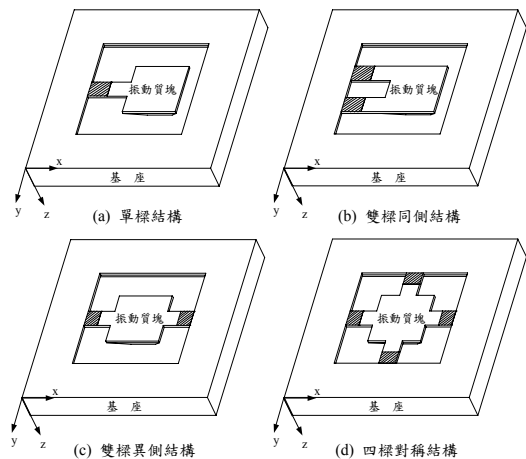


圖七 壓電式加速度感測器之構造示意圖

四 懸樑型加速度微感測器之系統模式

4.1 結構分析比較

懸樑型 (Cantilever mode) 加速度微感測器最基本之結構如圖八(a)所示，它是由一根固定在基座上之懸樑及一振動質塊所組成；且在懸樑的上方鍍上一層壓電材料以作為轉換器 (圖八中虛線部份)。雖然此結構構造簡單，但在感測器受到加速度時，振動質塊除了沿 z 方向作上下的運動外，還可能會繞著 y 軸及 x 軸作旋轉運動，在推導其系統模式時將變得很複雜。而另一種採雙樑的結構如圖八(b)及圖八(c)所示，振動質塊同樣也可能會繞著 y 軸 (圖八(b)) 或繞著 x 軸 (圖八(c)) 作旋轉的運動。所以，大部份的加速度感測器的結構均採用四根懸樑之對稱結構，如圖八(d)，以使得振動質塊在 z 方向的運動具有較高的敏感性，而減少其它方向運動的敏感性。換言之，當加速度感測器受到一加速度時，振動質塊僅沿 z 方向作上下的直線運動。因此，本文在懸樑型加速度感測器的分析中，採用四樑對稱的結構，以簡化分析的複雜性。



圖八 懸樑型加速度微感測器之結構

4.2 靜態分析

懸樑型加速度感測器之模型，如圖 九所示，中央的振動質塊是由四根固定在基座上之懸樑所支撐著，且在靠懸樑的固定端上方鍍上 PZT 轉換器（包括：上電極、PZT 薄膜及下電極），其懸樑之細部放大圖如圖 十所示。

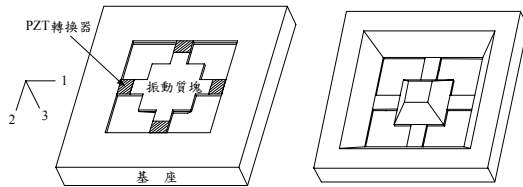


圖 九 懸樑型加速度感測器模型

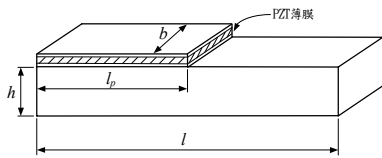


圖 十 懸樑之細部放大圖

為簡化系統模式推導步驟，文中的加速度感測器採用以下的假設：

- (1) 加速度感測器之懸臂樑的質量可忽略，整個結構質量集中於振動質塊的中央
- (2) 振動質塊及基座為剛性體
- (3) 線彈性系統，懸樑的分析適用虎克定律 (Hook's Law)
- (4) 振動質塊僅作第 3 方向之位移
- (5) PZT 薄膜及電極的厚度甚小於懸樑之厚度，不影響懸樑之剛性

假設加速度感測器在基座加速 z_i 的瞬間，振動質塊與基座間產生 z_s 之相對位移。若取任一懸樑來作分析，則此懸樑相當於兩端受固定之固定樑，其中一端的支承垂直下降了 z_s 之位移，若只考量第一振動模態，懸樑中點 C 為反曲點，其變形量為 $z_s/2$ ，其自由體圖如圖 十一所示。

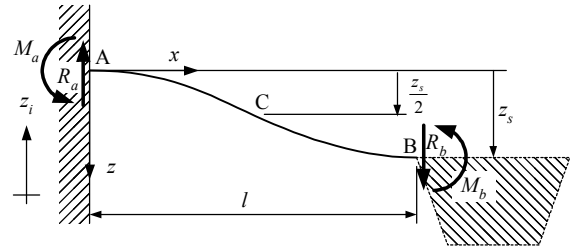


圖 十一 懸樑之自由體圖

離固定端距離 x 之彎矩為：

$$M(x) = R_a x - M_a \quad (15)$$

當微小變形時，樑的線彈性變形微分方程式可表為

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (16)$$

代入邊界條件解上述微分方程式，則可以計算出樑中任一位置 x 之彎矩為

$$M(x) = \frac{12EIz_s}{l^3} x - \frac{6EIz_s}{l^2} \quad (17)$$

假設 PZT 薄膜與懸樑間具有完美之結合，當加速度感測器在加速的瞬間，PZT 薄膜在第 1 方向所受之應力近似等於懸樑表面所受之應力。

$$T_1 = \frac{M(x) \cdot z}{I} \approx \frac{Ehz_s}{l^2} \left(3 - \frac{6x}{l} \right) \quad (18)$$

而震動質塊由四根懸吊樑支撐，因此可求得其懸吊剛性 K 為

$$K = \frac{48EI}{l^3} \quad (19)$$

其中 $I = \frac{1}{12}bh^3$ 為懸樑斷面慣性矩

4.3 振動質塊

由於以 KOH 非等向性蝕刻矽晶圓之緣故，所蝕刻出之加速度感測器的振動質塊外形如同一個截去頭端之金字塔，圖 十二為振動質塊之細部放大圖。

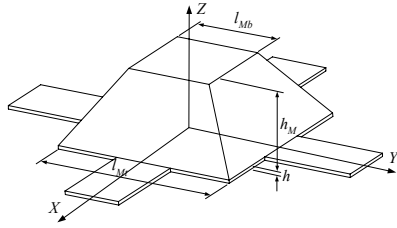


圖 十二 振動質塊之細部放大圖

積分可求得振動質塊之質量為：

$$M = \frac{\sqrt{2} \cdot \rho}{6} \left[l_M^3 - (l_M - \sqrt{2} \cdot h_M)^3 \right] + \rho \cdot l_M^2 \cdot h \quad (20)$$

其中 ρ 為密度

4.4 系統轉移函數

此系統之機械轉移函數與(5)式相同，唯其機械敏感度 S_m 為：

$$S_m \equiv \frac{M}{K} = \frac{Ml^3}{48EI} = \frac{Ml^3}{4Ebh^3} \quad (21)$$

若假設 PZT 薄膜僅受到第 1 方向的應力，而在其他方向的應力 (T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 及 T_6) 均為零，且當外加電場為零時，根據壓電方程式，可求出 PZT 薄膜所產生之電荷為：

$$Q = \int_0^{l_p} D_3 b \, dx = d_{31} b \int_0^{l_p} T_1 \, dx \quad (22)$$

將(18)式代入(22)式，可以得到：

$$Q = \frac{3d_{31}bEhl_p z_s}{l^2} \left(1 - \frac{l_p}{l} \right) \quad (23)$$

若在四根懸樑的上方各鍍上一層 PZT 薄膜，且將此四層 PZT 薄膜並聯在一起，則振動質塊單位位移所產生之總電荷將為四倍，類比於(6)式，振動質塊單位位移 PZT 所產生的電荷為：

$$K_q = \frac{12d_{31}bEhl_p}{l^2} \left(1 - \frac{l_p}{l} \right) \quad (24)$$

將機械與電性敏感度代入式(14)，即可得到壓電薄膜懸樑式微加速度計的系統轉移函數：

$$\frac{e_o}{z_i}(D) = \frac{3Md_{31}l_p \left(1 - \frac{l_p}{l} \right)}{h^2 C} \cdot \frac{\tau D}{\tau D + 1} \cdot \frac{w_n^2}{D^2 + 2\zeta w_n D + w_n^2} \quad (25)$$

感測器之敏感度與懸樑之各部尺寸、PZT 薄膜的壓電常數 d_{31} 、振動質塊的質量 M 及總電容 C 有關。其中以懸樑的厚度 h 對加速度微感測器之輸出敏感度影響最大，為平方倍之關係。雖然減少懸樑之厚度可增加敏感度，但反而減少了應用頻寬。因此，設計時應權衡特性需求來選擇這些參數。

3 電腦輔助模擬分析

為驗證所建立系統模式的正確性，本文以 ANSYS 5.3 有限元素分析軟體來進行加速度微感測器之結構自然頻率與機械系統頻率響應模擬分析。文中採用之加速度微感測器之各部尺寸如表一，其中由圖十一可知 PZT 薄膜的長度 l_p 設定為懸樑長度 l 之一半 ($l_p = l/2$)，因此時薄膜上所承受之應力皆為同向，可產生較大之增益。懸樑及質塊所使用之材料為矽 (Si)；壓電薄膜為銦鈦酸鉛 (PZT)；上、下電極為白金 (Pt)，各材料之機械性質如表二所示。另外，假設 PZT 薄膜之厚度 h_p 為 $0.3\mu\text{m}$ ；電極層之厚度 h_e 為 $0.02\mu\text{m}$ ；系統之阻尼比 ζ 假設為 0.02 。

表一 感測器微結構之各部尺寸

懸樑長度 l	400 μm
懸樑寬度 b	200 μm
懸樑厚度 h	15 μm
質塊邊長 l_M	800 μm
質塊厚度 h_M	300 μm

表二 加速度微感測器結構之材料性質

	楊氏模數 E (N/m ²)	柏松比 ν	密度 ρ (kg/m ³)
懸樑及質塊	1.69×10^{11}	0.0625	2330
壓電薄膜	-	-	7550
上、下電極	1.71×10^{11}	0.39	21450

其中壓電薄膜之性質假設與 Zr/Ti 比值為 52/48 之塊材 (bulk) PZT 相似，其勁度係數矩陣為：

$$[C]^E = \begin{bmatrix} 11.425 & 5.8294 & 5.8525 & 0 & 0 & 0 \\ 5.8294 & 11.425 & 5.8525 & 0 & 0 & 0 \\ 5.8525 & 5.8525 & 9.8181 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.0747 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.0747 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6042 \end{bmatrix} \times 10^{10} \quad (26)$$

在建構 ANSYS 之有限元素模型時，為減少分析計算時間及記憶體，本文假設感測器之邊緣基座為剛性體，另外，由於感測器微結構外形在 x 及 y 軸均呈對稱，故僅需建構出四分之一模型即可，其有限元素模型如圖 十三所示。

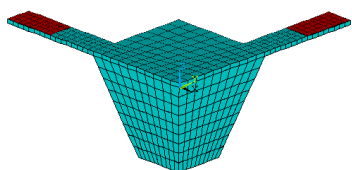


圖 十三 感測器微結構之有限元素模型

5.1 自然頻率分析

自然振動頻率為結構之特性，與負載無關。由先前機械模式所導出的加速度微感測器結構之自然頻率為：

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (27)$$

其中 K 與 M 同式(19)與式(20)

表 三為利用(27)式及 ANSYS 計算結構自然頻率之結果。兩者的自然頻率差異不大。因此此例中，壓電薄膜、上及下電極對整體結構剛性之影響可忽略。

表 三 結構自然頻率比較

	(27)式估計	ANSYS	差異%
自然頻率 f_n	25654Hz	25742Hz	0.342

5.2 機械系統頻率響應分析

在頻率響應分析中，假設負載為穩態之周期函數，如： $F=A \sin \omega t$ 。由先前系統之機械轉移函數可

知加速度 \ddot{z}_i 與振動質塊之相對位移 z_s 間之關係為：

$$\frac{z_s}{\ddot{z}_i}(D) = \frac{MI^3}{4Ebh^3} \cdot \frac{w_n^2}{D^2 + 2\zeta w_n D + w_n^2} \quad (28)$$

表 四為利用(28)式及 ANSYS 計算在不同頻率下之機械響應振幅。其中 ANSYS 部份，本文是以 Harmonic 來做分析，輸入加速度大小為 1m/sec^2 下，求得振動質塊上方中間節點之 z 方向位移，圖 十四為 ANSYS 所繪出之機械響應圖。

表 四 理論模式與 ANSYS 之機械響應比較

頻率 Hz	模式估計 $\times 10^{-11} \text{ m/m/s}^2$	ANSYS $\times 10^{-11} \text{ m/m/s}^2$	差異 %
100	3.8491	3.84293	0.1603
300	3.8495	3.84339	0.1587
500	3.8505	3.84432	0.1605
1000	3.8549	3.84867	0.1616
3000	3.9023	3.89569	0.1694
5000	4.0008	3.99328	0.1880

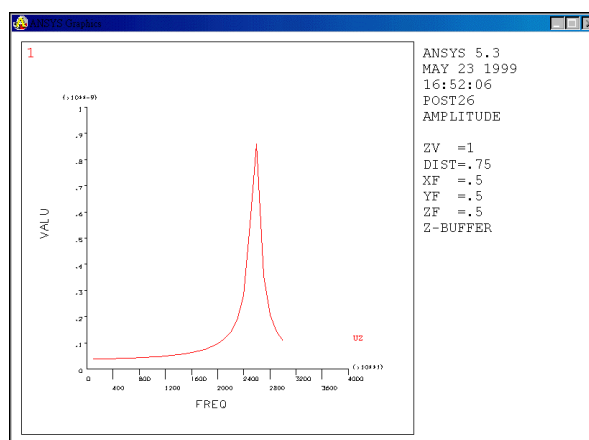


圖 十四 感測器微結構之機械響應

由於在系統模式中的質量計算僅考慮振動質塊的質量，並假設所有質量集中於質塊之中心，且忽略壓電薄膜與電極對彈性懸樑剛性的影響。因此最大之誤差小於 0.5% 是可接受的。

在系統模式中所做之假設應是成立，且可利用將來作為設計分析之依據。雖然以 ANSYS 分析可較本文提出之系統模式更近似於實際模型，但在分析計算上較為費時。因此，本文所提出的簡化模式，

可方便地用來估計加速度微感測器之機械行為，與瞭解各參數間對輸出的相互關係。

六 結 語

本文提出壓電薄膜加速度微感測器之系統模式，以四根對稱懸樑支撐振動質塊之機械結構為例，探討各個參數間的互動與輸出特性間的關係。文中並以一數值例，分別以所推導之機械模式及有限元素軟體 ANSYS 分析計算感測器微結構的自然頻率及機械頻率響應，驗證機械系統模式之正確性。未來可利用所提出之系統模式作為設計之參考依據，進行感測器微結構之穩健最佳化設計，以提高加速度微感測器量測之準確性。

誌 謝

本研究承蒙國科會支持，計劃編號 NSC 88-2216-E-011-013，特誌謝意。

參 考 文 獻

1. Polla, D. L., and Francis, L. F., "Ferroelectric Thin Films in Microelectromechanical Systems Applications", *MRS Bulletin*, pp. 59-65 (1996).
2. Okuyama, M. "Microsensors and Microactuators Using Ferroelectric Thin Films", *IEEE International Symposium on Microelectronics and Human Science*, pp. 29-34 (1998).
3. Kloeck, B., Collins, S. D., de Rooij, N. F., and Smith, R. L. "Study of Electrochemical Etch-Stop for High-Precision Thickness Control of Silicon Membranes", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 36, No. 4, pp. 663-669 (1989).
4. Fricke, J., and Obermeier, E. "Cantilever beam accelerometer based on surface micromachining technology", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 3, pp. 190-192 (1993).
5. Plaza, J. A., Esteve, J., and Lora-Tamayo, E. "Simple technology for bulk accelerometer based on bond and etch back silicon on insulator wafers", *Sensors and Actuators A*, Vol. 68, pp. 299-302 (1998).
6. Im, S., and Atluri, S.N. "Effect of a Piezo-Actuator on a Finitely Deformed Beam Subjected to General Loading", *AIAA Journal*, Vol.27, No.12, pp.1801-1807 (1989).
7. Ha, S.K., Keilers, C., and Chang, F.K. "Finite Element Analysis of Composite Structures Containing Distributed Piezoceramic Sensors and Actuators", *AIAA Journal*, Vol.30, No.3, pp.772-780 (1992).
8. van Kampen, R. P., and Wolffenbuttel, R. F. "Modeling the mechanical behavior of bulk-micromachined silicon

accelerometers", *Sensors and Actuators A*, Vol. 64, pp. 137-150 (1998).

9. Chen, H., Shen, S., and Bao, M. "Over-range capacity of a piezoresistive microaccelerometer", *Sensors and Actuators A*, Vol. 58, No. 3, pp. 197-201 (1997).
10. Berther, T., Gautschi, G. H., and Kubler, J. "Capacitive Accelerometers for Static & Low-Frequency Measurements", *Sound and Vibration*, pp. 28-30 (1996).
11. Matsumoto, Y., and Esashi, M. "Integrated Silicon Capacitive Accelerometer with PLL Servo Technique", *Sensors and Actuators A*, Vol. 39, pp. 209-217 (1993).
12. Blow, B. A., Harjain, R., Polla, D. L., and Tamagawa, T. "Dual Frequency Range Integrated Circuit Accelerometer Using Capacitive and Piezoelectric Sensing Techniques", *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Vol. 2, pp. 1120-1123 (1993).
13. Nemirovsky, Y., Nemirovsky, A., Muralt, P., and Setter N. "Design of a novel thin-film piezoelectric accelerometer", *Sensors and Actuators A*, Vol. 56, pp. 239-249(1996).

ABSTRACT

This paper discusses the electromechanical system modeling of microaccelerometer using piezoelectric thin film. Because of the advantages of high piezoelectric constant and temperature stability, piezoelectric thin films are very promising in the applications of microsensors and microactuators. This research analyzes the dynamic characteristics of silicon microstructure and piezoelectric thin film. The proposed model illustrates the interactions of design variables, which serves as a performance reference in design tradeoff. A FEM analysis is applied at the end to verify the frequency response of the microstructure.

Keywords: MEMS, Microsensor, Accelerometer, System modeling.