

應用田口方法於壓電薄膜加速度微感測器之結構設計

余志成* 藍慶斌

國立台灣科技大學 機械工程系

摘要

壓電薄膜由於具有高壓電係數、體積小、以及可應用於高自然頻率設計等優點，已廣泛的應用於微感測與微致動元件上。然而微感測器的結構與材料的製造誤差，將直接影響感測器的準確性與重現性，如何在參數設計階段，減少系統輸出對誤差的敏感度，是感測器設計中，非常重要但卻常被忽略的課題。本文以推導的懸樑壓電式加速度感測器之系統模式為例，說明壓電薄膜加速度微感測器之設計穩健化的步驟與可行性。文中將探討誤差的成因，包括蝕刻造成的結構尺寸誤差與薄膜特性的製造變異，應用田口品質工程法，進行加速度微感測器機械結構之參數設計，以降低微感測器頻率響應中增益的變異範圍。

關鍵字：微機電、微加工誤差、穩健化設計

簡介

隨著近年來產品短、小、輕、薄化的趨勢，微機電系統 (Micro Electro Mechanical System, MEMS) 已成為熱門的研究課題。微感測器是微機電系統中最早被商品化的產品，也是發展最快速的技術之一。大部份的微感測元件係利用矽微細加工 (Silicon micromachining) 技術在矽晶圓上製作出三次元的微結構，如：懸樑、橋、隔膜 (Diaphragm)、齒輪、微馬達等結構。若能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。由於微感測器的製程技術基本上與一般積體電路製程極為相似，將非常適於大量製造以降低成本。

加速度微感測器依能量傳遞的方式，可略分成壓阻式 (Piezoresistive) [1]、電容式 (Capacitive) [2,3] 及壓電式 (Piezoelectric) [4] 等三種。其中壓電式加速度微感測器之感測原理係利用壓電材料的壓電效應來感測加速度之大小，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鋇鈦酸鉛

($\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$, 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，已廣泛地應用在感測與致動元件中，如微加速度計 (Micro-accelerometer)、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[5]。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[6]。

現有文獻多著重於微感測元件製造技術的探討[7-9]，對於壓電薄膜應用於微感測器的機電系統模式的研究則較為有限。其中部分[10,11]應用有限元素法，針對彈性元件上受到彎曲力矩、側向剪力、軸向剪力的壓電薄膜，進行靜態與動態壓電特性分析。有些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[12]。Nemirovsky 等[13]則利用壓電薄膜進行壓縮式微加速度計的設計。然而，對於微感測元件參數設計的分析 [14]，與製造誤差對於微感測器精度與設計影響之探討則較為缺乏。因此本文將以懸樑型壓電薄膜加速度微感測器的機電系統模式為例，應用田口品質工程法進行感測器微結構之設計穩健化。

懸樑型壓電薄膜加速度微感測器

壓電式加速度計中的位移轉換元件 (Displacement Transducer)，依其結構變形的受力方式，一般可分為壓縮型 (Compression mode)、剪力型 (Shear mode) 及彎曲型 (Bending mode) 或稱為懸樑型 (Cantilever mode) 等三種類型，其構造之示意如圖 1。以四樑對稱的結構的微加速度計為例 (圖 2)，振動質塊在第 3 方向 (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。其中的振動質塊是由四根連接在基座上的懸樑所支撐，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 3 所示。

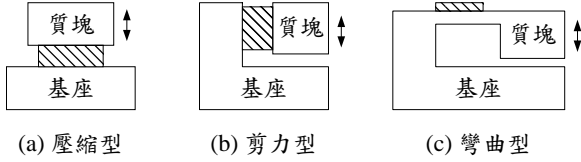


圖 1 壓電式加速度感測器之構造示意圖

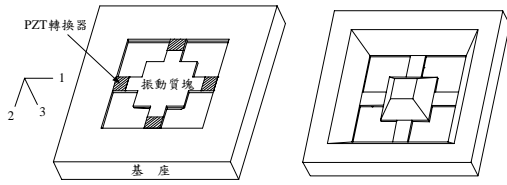


圖 2 懸樑型加速度微感測器模型

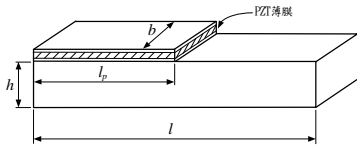


圖 3 懸樑之細部放大圖

為簡化系統模式推導步驟，文中的加速度微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

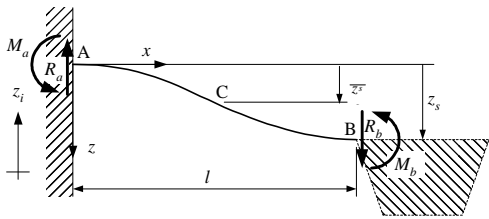


圖 4 懸樑之自由體圖

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 4 所示。

當微小變形時，樑的線彈性變形微分方程式如下

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (1)$$

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

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

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於懸樑表面所受之彎曲應力。

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

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

$$K = \frac{48EI}{l^3} \quad (4)$$

其中 $I = \frac{1}{12}bh^3$ 慣性矩

振動質塊

若以 KOH 非等向性蝕刻矽晶圓，其所蝕刻出之加速度微感測器的振動質塊外形如同一個截去頭端之金字塔，圖 5 為振動質塊之細部放大圖。

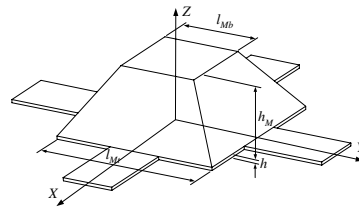


圖 5 振動質塊之細部放大圖

積分可求得振動質塊之質量為：

$$M = \frac{\sqrt{2} \cdot \rho}{6} \left[l_{M1}^3 - (l_{M1} - \sqrt{2} \cdot h_M)^3 \right] + \rho \cdot l_{M1}^2 \cdot h \quad (5)$$

其中 ρ 為質塊密度

系統轉移函數

壓電式加速度微感測器主要係利用質量—彈簧—阻尼系統，將感測器基座所固定待測物件的加速度，轉換為振動質塊相對於基座的位移量。再以材料的壓電特性，將機械應變轉換為電荷輸出。由於涉及機電能量之轉換，因此在分析

此系統模式時，可分成機械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 z_s 與加速度 \ddot{z}_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 z_s 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[17]。

$$T = G_m \times G_e \quad (6)$$

圖 4 可簡化為質量—彈簧—阻尼系統，其系統轉移函數為：

$$\frac{z_s}{\ddot{z}_i}(D) = S_m \cdot \frac{w_n^2}{D^2 + 2\zeta w_n D + w_n^2} \quad (7)$$

$$\text{其中 } S_m \equiv \frac{M}{K} = \frac{Ml^3}{48EI} = \frac{Ml^3}{4Ebh^3} \quad \text{機械敏感度}$$

$$w_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad \text{微結構自然頻率}$$

$$\zeta = \frac{B}{2\sqrt{KM}} \quad \text{系統阻尼比}$$

若假設 PZT 薄膜僅考慮第 1 方向的應力，其他方向的應力 (T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 及 T_6) 均可略，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：

$$Q = \int_0^{l_p} D_3 b \, dx = d_{31} b \int_0^{l_p} T_1 \, dx \quad (8)$$

將(3)式代入(8)式，可以得到：

$$Q = \frac{3d_{31}bEhl_p z_s}{l^2} \left(1 - \frac{l_p}{l}\right) \quad (9)$$

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，則振動質塊單位位移所產生之總電荷將為四倍，振動質塊單位位移 PZT 所產生的電荷為：

$$K_q = \frac{12d_{31}bEhl_p}{l^2} \left(1 - \frac{l_p}{l}\right) \quad (10)$$

典型壓電轉換器(PZT Transducer)的系統之電性轉移函數如下[18, pp.261]：

$$\frac{e_o}{z_s}(D) = S_e \cdot \frac{\tau D}{\tau D + 1} \quad (11)$$

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

$\tau \equiv RC$ 轉換器電路之時間常數

R 為轉換器電路之等效電阻

C 為轉換器電路之等效電容

結合式(7)與式(11)，即可得到懸樑式壓電薄膜微加速度計的系統轉移函數：

$$\frac{e_o}{\ddot{z}_i}(D) = \frac{3Md_{31}l_p \left(1 - \frac{l_p}{l}\right)}{h^2 C} \cdot \frac{\tau D}{\tau D + 1} \cdot \frac{w_n^2}{D^2 + 2\zeta w_n D + w_n^2} \quad (12)$$

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。

壓電式加速度感測器之頻率響應若以 5% 作為容差時，其公稱應用頻寬則介於 $3/\tau$ 與 $w_n/5$ 之間，如圖 6 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 。而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，將造成頻率響應曲線的偏移，影響加速度感測器的準確性。因此，在感測元件設計上應一併考慮這些問題。

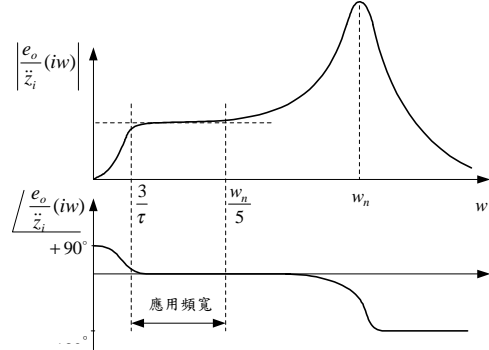


圖 6 加速度感測器之頻率響應

製造誤差探討

產品生命週期的差異性造成設計參數值的偏移，這些偏移的主因來自於製造誤差、使用環境差異及參數本身隨時間的改變。微感測器的準確性與重複性受微結構的幾何尺寸與材料特性所影響，而微結構之尺寸誤差主要來自微影過程[13, pp.38]，材料特性的差異則源自於壓電薄膜生長過程的不確定性。

微影轉換誤差 (Lithographic Transfer Errors)

微影圖案轉移過程中，可能發生以下兩種的誤差：微影光罩的對位誤差 ΔR ，如圖 7(a)所示，

與微影轉換過程中因光源波長的限制及顯影劑 (Developer) 的選擇性造成的顯影誤差 ΔD ，如圖 7(b) 所示。以紫外光微影製程 (UV lithography) 而言，實際投影在光阻上的圖案與光罩影像可能有高達 $0.5\mu\text{m}$ 的誤差。

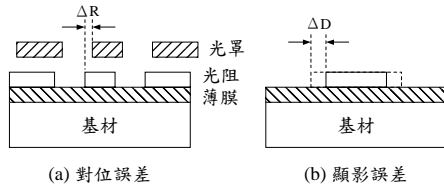


圖 7 微影轉換過程之誤差

微細加工誤差 (Micromachining Errors)

微細加工誤差主要是因光阻上的圖案未被準確地轉移至蝕刻薄膜上所致，其轉換的正確性是取決於蝕刻劑的非等向性。以反應性離子蝕刻 (RIE) 而言，可產生近乎垂直的側壁。相反地，而等向性的濕蝕刻 (Wet etching) 則會產生半圓弧的壁及底切 (Undercuts) 誤差 ΔU ，如圖 8(a) 所示。

而在垂直晶圓表面的方向上，薄膜沈積速率的變異也會造成尺寸上的誤差。當薄膜經微影後，垂直尺寸是由蝕刻的正確性及其選擇性所決定，也就是薄膜蝕刻率與其下方材料蝕刻率之比。由於大部份的蝕刻選擇性有限，因此須有嚴緊的蝕刻控制，或使用較厚的蝕刻停止層，以防止過度的蝕刻 (Over-etching)，如圖 8(b) 所示。

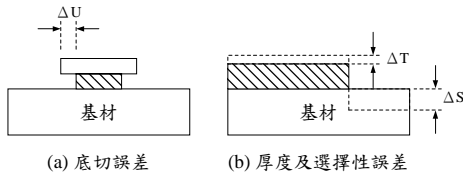


圖 8 微細加工過程之誤差

材料特性誤差 (Material Errors)

材料在成長製作過程中，可能因製程及周遭環境之影響而造成材料特性誤差。尤其是薄膜的機械參數變異，可能有 10-20% 之不確定性。這些特性包括：楊氏模數 (Young's modulus)、柏松比 (Poisson's ratio)、密度 (density)、介電常數 (dielectric constant) 及電阻率 (resistance) 等。一般以逐一校正的方式處理材料特性的誤差，但在經濟考量上往往不可行。

設計穩健化

微感測器因其尺寸微小化的緣故，其尺寸誤差所造成的性能差異將更加可觀。另一方面，材料機電特性本身也會有相當的誤差分佈，這些誤

差不僅影響機械結構，也將造成放大電路設計性能的變異 [14, pp.184]，因此在電路控制上也應考慮到設計穩健化。本文將以機械結構各部尺寸及楊氏模數因製造上所造成的誤差變異為例，以田口品質工程法進行設計穩健化。

田口品質工程法 [14] 為一有效的穩健化設計工具，以訊噪比 (Signal-to-Noise ratio) 定義設計穩健性，並藉由直交表 (Orthogonal Array) 實驗計畫與變異分析 (Analysis of Variance) 分析控制因子對輸出的影響性，進行參數設計，降低輸出對噪音因子的敏感度。

圖 9 為加速度微感測器之機械結構。其中矽結構體 x 及 y 方向之楊氏模數 (Young's modulus) 為 $1.69 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、柏松比 (Poisson's ratio) 為 0.0625、密度為 2330 kg/m^3 。壓電薄膜的機電性質假設與 Zr/Ti 比值為 52/48 的塊狀 (bulk) PZT 相似， $d_{31} = -93.5$ 。而上下電極則採用白金 (Pt)。

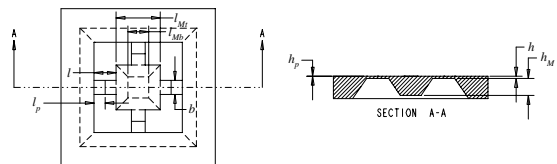


圖 9 加速度微感測器之結構

初始設計之各部尺寸如表 1 所示，其中由圖 4 可知 PZT 薄膜的長度 l_p 設定為懸樑長度 l 之一半 ($l_p = l/2$)，因薄膜上所承受之應力皆為同向，可產生較大之增益。本文主要在論證以參數設計方式於微感測器結構之穩健化設計的可行性，因此部份的參數均為假設的參考值：放大電路之總電容 $C = 10 \text{ pF}$ 、電阻 $R = 10^{10} \Omega$ ；PZT 薄膜之厚度 h_p 為 $0.3 \mu\text{m}$ ；電極層之厚度 h_e 為 $0.2 \mu\text{m}$ ；整個系統阻尼比為 0.02。

表 1 感測器微結構之初始設計

懸樑長度 l	$400 \mu\text{m}$
懸樑寬度 b	$200 \mu\text{m}$
懸樑厚度 h	$15 \mu\text{m}$
質塊邊長 l_M	$800 \mu\text{m}$
質塊厚度 h_M	$300 \mu\text{m}$

理想加速度微感測器在其適用之頻寬內，其輸入 (加速度之振幅) 與輸出 (電壓之振幅) 間之關係為線性的轉換。換言之，即斜率 (感測器轉換增益) 保持某一固定值。但在實際製造上，

可能因誤差之存在而呈現如圖 10 的分佈現象。因此設計之重點為降低轉換增益對誤差之敏感度，以減少變異分佈的範圍。

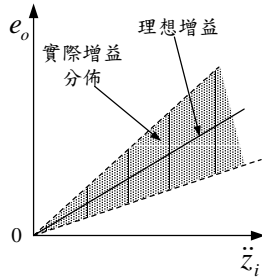


圖 10 加速度微感測器敏感度變化之關係

理想的加速度微感測器之敏感度為一定值，其轉移函數之大小值為：

$$g = \left| \frac{e_o}{z_i} \right| = \left| S \cdot \frac{\tau(i\omega)}{\tau(i\omega)+1} \cdot \frac{w_n^2}{(i\omega)^2 + 2\zeta w_n(i\omega) + w_n^2} \right| \quad (13)$$

微感測器設計中，影響加速度微感測器機械結構設計的主要控制因子包括：懸樑的長度 l 、懸樑的寬度 b 、懸樑的厚度 h 、振動質塊上方的長度 l_{Ml} 及振動質塊的厚度 h_M 等 5 個控制因子。而在噪音因子方面，為簡化說明起見，本文只考慮結構誤差與負載變化，包括微結構的尺寸公差：懸樑的長度 Δl 、懸樑的寬度 Δb 、懸樑的厚度 Δh 、振動質塊上方的長度 Δl_{Ml} 及振動質塊的厚度 Δh_M 。材料特性的不確定性：懸樑的楊氏模數 ΔE 。此外，加速度微感測器之負載頻率的變化，也是一個重要的影響因子，因此將加速度之振動頻率 w 視為噪音因子。共計 7 個噪音因子。

田口品質工程以訊號噪音比 (Signal/Noise, S/N) 來定義其目標函數，此問題本為動態問題，但本文以轉移函數的方式模擬感測器的系統輸出，因此輸出電壓與加速度間的關係由式所定義，所以可簡化為望目型 (Nominal-the-best) 的設計問題，其目標函數可定義為：

$$S/N = 10 \log_{10} \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (14)$$

其中 $\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i$ 平均值

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (g_i - \mu)^2 \quad \text{變異數}$$

g_i 為外直交表實驗中第 i 組實驗輸出量測值
 n 為外直交表之實驗數目

將各控制因子三水準化，並將初始設計值設定為第二水準，如表 2。

表 2 控制因子之水準設定

	Level 1	Level 2	Level 3
l	300	400	500
b	180	200	220
h	10	15	20
l_{Ml}	700	800	900
h_M	250	300	350

單位： μm

假設加速度微感測器的應用頻率 f 介於 5 至 5000Hz 之間，為模擬該範圍之噪音，將頻率因子 $w (= 2\pi f)$ 予以四水準化。而其餘的噪音因子為製造之誤差分佈，予以二水準化，如表 3。由於本文並未實際製造量測誤差值，故表中之誤差分佈均為推論之假設值。

表 3 噪音因子之水準設定

	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
w	31.416	10493	20954	31416
Δl	-1.0	1.0		
Δb	-1.0	1.0		
Δh	-0.8	0.8		
Δl_{Ml}	-1.0	1.0		
Δh_M	-0.3	0.3		
ΔE	-2.0	2.0		

單位： w 為 rad/sec； ΔE 為 Gpa；其餘為 μm

田口方法的實驗計劃是將控制因子配置於一個直交表，稱之為內直交表。並且將噪音因子配置於另一個直交表，稱之為外直交表，用來模擬該設計在製造及使用環境下所可能產生的參數變異。

經由因子分析後可知，本實驗具有 5 個三水準之控制因子，因此選擇 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 直交表的第 2 至 6 行為內直交表，其實驗配置如表 4。而噪音因子共計有 1 個四水準及 6 個二水準因子，由於並沒有適當之直交表可直接選用，因此可利用行合併法 (Column merging method)，選用 L_{16} 直交表的第 4 至 9 行並將第 1、2 行及其交互作用行 (第 3 行) 合併為 1 行四水準，以作為外直交表，其實驗配置如表 5。

完成實驗配置後，根據內直交表 18 組的設計變數組合，分別在外直交表 16 種模擬噪音情況下，利用 (13) 式計算出加速度微感測器之增益 (Gain) 大小值，接著利用望目型之公式 ((14) 式)，可以計算出各組之平均值及 S/N，如表 4 所示。接著利用這些統計資料，可分別繪出各因子對

mean 及 S/N 之總效果圖，如圖 11及圖 12所示。

表 4 內直交表之實驗配置

	<i>l</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>l_{Mt}</i>	<i>h_M</i>	mean	S/N
1	300	180	10	700	250	1.1434	15.5038
2	300	200	15	800	300	0.7720	19.1410
3	300	220	20	900	350	0.6313	21.5853
4	400	180	10	800	300	3.2188	14.0685
5	400	200	15	900	350	1.9936	18.5755
6	400	220	20	700	250	0.5266	21.6968
7	500	180	15	700	350	1.5987	18.5210
8	500	200	20	800	250	1.1545	21.3503
9	500	220	10	900	300	7.4810	10.7328
10	300	180	20	900	300	0.5961	21.5888
11	300	200	10	700	350	1.2603	15.4802
12	300	220	15	800	250	0.7157	19.1983
13	400	180	15	900	250	1.7218	18.6565
14	400	200	20	700	300	0.5587	21.6415
15	400	220	10	800	350	3.3485	14.3853
16	500	180	20	800	350	1.3052	21.1525
17	500	200	10	900	250	6.8572	10.6950
18	500	220	15	700	300	1.5362	18.7450

表 5 外直交表之實驗配置

	<i>w</i>	Δl	Δb	Δh	Δl_{Mt}	Δh_M	ΔE
1	31.416	-1.0	-1.0	-0.8	-1.0	-0.3	-2.0
2	31.416	-1.0	-1.0	-0.8	-1.0	0.3	2.0
3	31.416	1.0	1.0	0.8	1.0	-0.3	-2.0
4	31.416	1.0	1.0	0.8	1.0	0.3	2.0
5	10493	-1.0	-1.0	0.8	1.0	-0.3	-2.0
6	10493	-1.0	-1.0	0.8	1.0	0.3	2.0
7	10493	1.0	1.0	-0.8	-1.0	-0.3	-2.0
8	10493	1.0	1.0	-0.8	-1.0	0.3	2.0
9	20954	-1.0	1.0	-0.8	1.0	-0.3	2.0
10	20954	-1.0	1.0	-0.8	1.0	0.3	-2.0
11	20954	1.0	-1.0	0.8	-1.0	-0.3	2.0
12	20954	1.0	-1.0	0.8	-1.0	0.3	-2.0
13	31416	-1.0	1.0	0.8	-1.0	-0.3	2.0
14	31416	-1.0	1.0	0.8	-1.0	0.3	-2.0
15	31416	1.0	-1.0	-0.8	1.0	-0.3	2.0
16	31416	1.0	-1.0	-0.8	1.0	0.3	-2.0

一般控制因子對輸出之影響性可分為四類。其中第Ⅲ類之因子對輸出之 mean 有影響而對 S/N 沒有影響，即所謂的調整因子。嚴格來說，本問題並沒有調整因子。但一般的作法是由因子中，選擇影響 S/N 最小的因子作為調整因子，若調整後仍離目標值很遠的話，則再調整次影響 S/N 很小的因子。由先前的分析，因子 *l* 及 *l_{Mt}* 雖對輸出 mean 及 S/N 皆有影響，但相較於其它因子其 S/N 影響不大，所以可將此二因子視為調整因子。

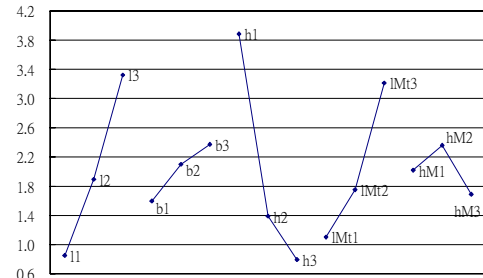


圖 11 各因子對 mean 之總效果圖

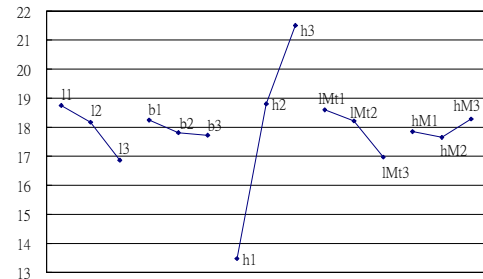


圖 12 各因子對 S/N 之總效果圖

為比較穩健設計在輸出變異上之改善，本文以初始設計之輸出平均值 $\text{mean} \cong 1.385 \text{ mV/m/sec}^2$ 為目標輸出值。以因子 *l* 及 *l_{Mt}* 作為調整因子，將穩健化設計輸出的平均值調整至目標值，而其他的因子水準則設定在 S/N 最大化的水準。調整後之穩健設計因子設定為：

表 6 感測器微結構之穩健設計

Control Factors (μm)				
<i>l</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>l_{Mt}</i>	<i>h_M</i>
442	180	20	900	350

結果比較

由實驗分析找出穩健化設計之後，可以加成本法模式 (Linear Superposition Model) [16] 來預測各水準組合下的輸出訊噪比以驗證實驗計畫的改善與正確性。加法模式所估計的初始及穩健設計之 S/N 值如下：

以加法模式估計初始設計之 S/N 值：

$$S/N_{\text{initial}}(b_2 h_2 l_{Mt2} h_{M2}) = m + b_2 + h_2 + l_{Mt2} + h_{M2} = 18.70$$

以加法模式估計穩健設計之 S/N 值：

$$S/N_{\text{robust}}(b_1 h_3 l_{Mt3} h_{M3}) = m + b_1 + h_3 + l_{Mt3} + h_{M3} = 21.22$$

最後針對初始設計及穩健設計進行確認模擬實驗。以這兩種設計變數組合，在同樣的噪音

影響下，計算其輸出增益大小及其統計資料，下表為加法模式的預測值及確認實驗之比較結果

表 7 初始設計及穩健設計的 S/N 比較

S/N	預測	實際計算
初始設計	18.70	18.86
穩健設計	21.22	21.17
改善	2.52	2.31

由上述比較之結果發現，以參數設計而得的穩健設計可較初始設計降低其對誤差之敏感度。穩健設計較初始設計有 2.307dB 的改善，圖 13 及圖 14 分別為初始與穩健設計的頻率響應分析，圖中的箭頭範圍代表在特定頻率下，微感測器因受製造誤差影響其輸出性能之變動範圍。在相同的製造變異下，穩健設計在量測的增益標準差方面，較初始設計改善了 23.4%，顯示穩健化設計降低了感測器增益對製造與負載變異的敏感度。而由其預測值與實際計算值間微小的差異，可驗證實驗計畫推論結果的正確性。而其間改善的幅度可以反覆實驗最佳化的方式再予以提高。

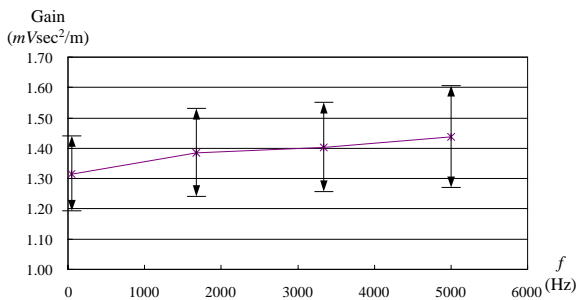


圖 13 初始設計之輸出性能分佈

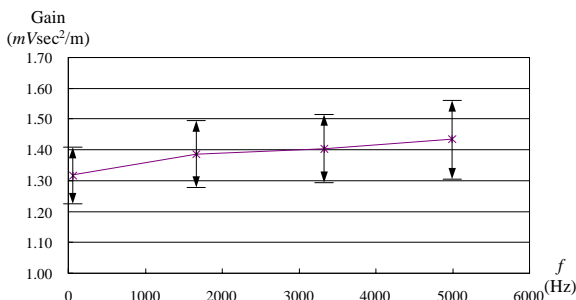


圖 14 穩健設計之輸出性能分佈

結 論

本文利用先前所提出的壓電薄膜加速度微感測器之系統模式，進行感測器微結構之設計穩健化。文中說明了製造變異對微感測器正確性與重現性之影響，並以田口品質工程法中的參數設計，進行加速度微感測器機械結構之設計穩健化，減少微感測器輸出響應對誤差之敏感度。本文所舉的穩健設計在量測的增益標準差方面，較初始設計改善了 23.4%，顯示微感測器設計穩健性的可行性。未來可結合電路設計與有限元素模擬，進行更完整的設計分析。

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] Chen H., Shen, S., and Bao, M. (1997) "Over-range capacity of a piezoresistive microaccelerometer", *Sensors and Actuators A*, Vol. 58, No. 3, pp. 197-201.
- [2] Berther, T., Gautschi, G. H., and Kubler, J. (1996) "Capacitive Accelerometers for Static & Low-Frequency Measurements", *Sound and Vibration*, pp. 28-30.
- [3] Matsumoto, Y., and Esashi, M. (1993) "Integrated Silicon Capacitive Accelerometer with PLL Servo Technique", *Sensors and Actuators A*, Vol. 39, pp. 209-217.
- [4] Blow, B. A., Harjain, R., Polla, D. L., and Tamagawa, T. (1993) "Dual Frequency Range Integrated Circuit Accelerometer Using Capacitive and Piezoelectric Sensing Techniques", *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Vol. 2, pp. 1120-1123.
- [5] Polla, D. L., and Francis, L. F. (1996), "Ferroelectric Thin Films in Microelectromechanical Systems Applications", *MRS Bulletin*, pp. 59-65.
- [6] Okuyama, M. (1998) "Microsensors and Microactuators Using Ferroelectric Thin Films", *IEEE International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, pp. 29-34.
- [7] Kloock, B., Collins, S.D., de Rooij, N.F., and Smith, R.L. (1989) "Study of Electrochemical Etch-Stop for High-Precision Thickness Control of Silicon Membranes", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 36, No. 4, pp. 663-669.
- [8] Fricke, J., and Obermeier, E. (1993) "Cantilever beam accelerometer based on surface

micromachining technology”, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 3, pp. 190-192.

- [9] Plaza, J. A., Esteve, J., and Lora-Tamayo, E. (1998) “Simple technology for bulk accelerometer based on bond and etch back silicon on insulator wafers”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 68, pp. 299-302.
- [10] Im, S., and Atluri, S.N. (1989) “Effect of a Piezo-Actuator on a Finitely Deformed Beam Subjected to General Loading”, *AIAA Journal*, Vol.27, No.12, pp.1801-1807.
- [11] Ha, S.K., Keilers, C., and Chang, F.K. (1992) “Finite Element Analysis of Composite Structures Containing Distributed Piezoceramic Sensors and Actuators”, *AIAA Journal*, Vol.30, No.3, pp.772-780.
- [12] van Kampen, R. P., and Wolffenbuttel, R. F. (1998) “Modeling the mechanical behavior of bulk-micromachined silicon accelerometers”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 64, pp. 137-150.
- [13] Nemirovsky, Y., Nemirovsky, A., Muralt, P., and Setter N. (1996) “Design of a novel thin-film piezoelectric accelerometer”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 56, pp. 239-249.
- [14] Gianchandani, Y. B., and Crary, S. B. (1998) “Parametric Modeling of a Microaccelerometer: Comparing I- and D-Optimal Design of Experiments for Finite-Element Analysis”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 7, No. 2, pp. 274-282.
- [15] Sze, S.M. (1994) , *Semiconductor Sensors*, John Wiley & Sons, Inc.
- [16] Phadke, M.S. (1989) , *Quality Engineering Using Robust Design*, Practice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA.
- [17] Yu, Jyh-Cheng and Lan, Ching-Bin (1999) “System Modeling and Robust Design of Microaccelerometer Using Piezoelectric Thin Film”, *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Taipei, Taiwan.
- [18] Doebelin, E. O. (1990), *Measurement Systems Application and Design*, McGraw-Hill, 4th ed.

THE APPLICATION OF TAGUCHI METHODS TO THE STRUCTURE OPTIMIZATION OF THE MICROACCELEROMETER WITH PIEZOELECTRIC THIN FILM

Jyh-Cheng Yu*
Ching-Bin Lan

*Department of Mechanical Engineering
National Taiwan University of Science and Technology
Taipei, Taiwan 106, R.O.C.*

ABSTRACT

Piezoelectric films are in wide use in the design of micro-sensors and micro-actuators due to the high dielectric constant, small size, and the possibly very high natural frequency. However, manufacturing errors result in the variations of design variables, which have significant effects on sensor accuracy. Minimization of performance sensitivity to manufacturing errors in the stage of parameter design has become an important issue in the design of microsensor. The paper addresses the design optimization and the robustness analysis using Taguchi methods to reduce the sensitivity of the sensor response to the dimensional errors of microstructure and variations of material properties. A system model of the microaccelerometer using piezoelectric thin film is proposed for the simulation of design optimization. The proposed scheme provides the robust design with a reduced variation of frequency response.

Keywords: MEMS, Micromachining, Robust Design.