



作者：王崇飛 (1999-08-19)；修改：王崇飛 (2000-05-05)；核可：徐業良 (2000-05-08)。

附註：本文為元智大學機械系大四自動化機械設計實務課程教材。

## 壓力感測元件簡介

### 一、壓力感測元件之原理介紹

在所有微細加工技術所製造的元件中，壓力感測元件是最早商品化的，同時應用也最為廣泛，壓力感測元件已大量地應用在汽車、醫療、工業量測、自動控制和各種電子產品上。壓力感測元件所應用的原理相當多，如壓電效應(piezoelectric)、壓阻效應(piezoresistive effects)、以及電容效應。

#### □ 壓電效應

所謂壓電效應是指當機械作用力作用於材料時，材料所能產生的電效應，相反的當施加電場於材料時，能夠使材料產生機械變形。這種現象只存在某些結晶材料，如石英(Quartz)、氧化鋅(ZnO)、鈦酸鋇陶瓷( $\text{BaTiO}_3$ )、鈦酸鉛鋇陶瓷( $\text{PbZrTiO}_3$ , PTZ)，或是一些特殊的化學聚合物如PVDF，由於矽晶具有中心對稱的網格結構無法展現其壓電性質，因此這些材料必需經過一定的製程塗佈於矽晶表面才能具有壓電性，如石英必需依一定的軸向切割、壓電陶瓷需經過高電場極化。

當施加外力  $F_q$  於壓電材料時，其表面充電量  $q$  滿足下式

$$q = \Xi F_q \quad (1)$$

其中  $\Xi(X_i)$  為材料之壓電係數(piezoelectric coefficient)，單位為庫倫/牛頓

工業界常用的壓電材料其壓電係數、介電常數如表1所示，其中石英為天然物質產量有限，而鈦酸鋇陶瓷( $\text{BaTiO}_3$ )與鈦酸鉛鋇陶瓷( $\text{PbZrTiO}_3$ )雖然具有相當高的壓電係數，但由於只能製作成厚膜實用性不高，因此業界常用可以利用蒸鍍方式製成薄膜的氧化鋅(ZnO)為壓電元件。

表 1 常見壓電材料於 300K 之特性

材質	結晶型式	運用方式	壓電係數 $\epsilon$	介電常數 $\epsilon$
Quartz	Glass	Bulk	2.33	4.0
PVDF	Polymer	Film	1.59	-
ZnO	Ceramic	Film	12.7	10.3
ZnO	Ceramic	Bulk	11.7	9.0
BaTiO <sub>3</sub>	Ceramic	Bulk	190	4100
PbZrTiO <sub>3</sub>	Ceramic	Bulk	370	300~3000

### □ 壓阻效應

所謂壓阻效應是指當材料受到應力作用時，材料的電阻值會改變的一種現象。這種現象普遍地存在各種材料中，其中以某些半導體的效應特別顯著。目前製造矽質壓力感測元件最常用的方法是利用擴散法或離子佈植法，將硼摻入單晶矽晶格中形成 p-n 接面，此 p-n 接面即為壓阻元件，可以用來感測矽晶隔膜上的壓力變化。感測壓力的電阻以惠斯登電橋(Wheatstone bridge)的方式來連接，如圖1所示，其中電阻R1即為矽質壓力感測元件。

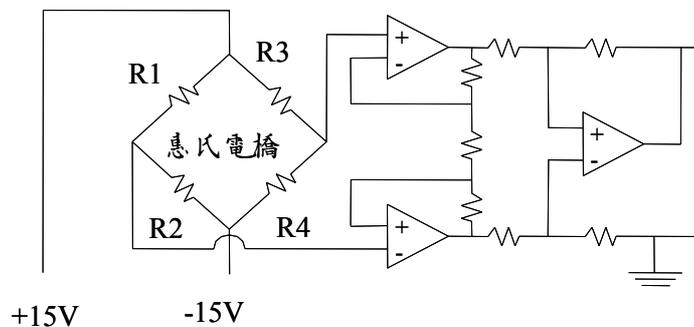


圖 1 應變計之訊號放大電路

惠斯登電橋之電阻與電壓關係滿足下式：

$$V_{out} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_{in} \quad (2)$$

若假設R1、R2、R3、R4均相等且都等於R，當壓力感測元件因壓力之變化產生 $\Delta R$ 之微小變化，則(2)式可化簡如下：

$$V_{out} = \frac{R^2 + R\Delta R - R^2}{(2R + \Delta R) \cdot 2R} V_{in} \cong \frac{\Delta R}{4R} V_{in} \propto \epsilon V_{in} \quad (3)$$

由於壓力感測元件之壓阻變化極小，因此必需再利用放大器將訊號放大，圖 1 為應變計訊號放大電路，其中惠氏電橋的輸出電壓與外加壓力  $P$  滿足以下的關係式。

$$V_{out} \propto KP \quad (4)$$

其中  $K$  是一個應變係數，其隨設計和製程而變，可以表示成以下的型式：

$$V_{out} = P \left( \frac{W_d}{T_d} \right)^2 \left( \frac{k}{S} \right) V_{in} \quad (5)$$

其中  $W_d$  是膜片寬度， $T_d$  是膜片厚度， $S$  是彈性係數， $V_{in}$  是輸入電壓。

由上面的關係式中我們可以看出若薄膜厚度越薄則感測出來的電壓越大，因此，我們可以說製膜技術的優劣決定了薄膜式壓力感測元件的性能，一般矽晶片基板上薄膜的厚度約在  $5 \sim 250 \mu\text{m}$ 。

## 二、壓力感測元件之種類

### □ 荷重規(load cell)

荷重規主要用途為感受力量變化的一種感測器，它是由 p-n 型壓阻材料所製成，圖 2 是壓阻材料的內部示意圖，當右邊施加外力  $F$  後，改變阻值，造成  $V_o$  間電壓或電流大小之改變，這是壓阻材料受到外界施力，其物理性質改變的結果，我們利用這個特性就可以用來測量力量之變化。在選用荷重規時，須注意量測物體的最大荷重、輸出訊號值、參考電源大小及反應時間等特性。一般來說荷重規的訊號極為微弱，且為非線性的輸出，需要經過訊號放大器作放大與補正處理。

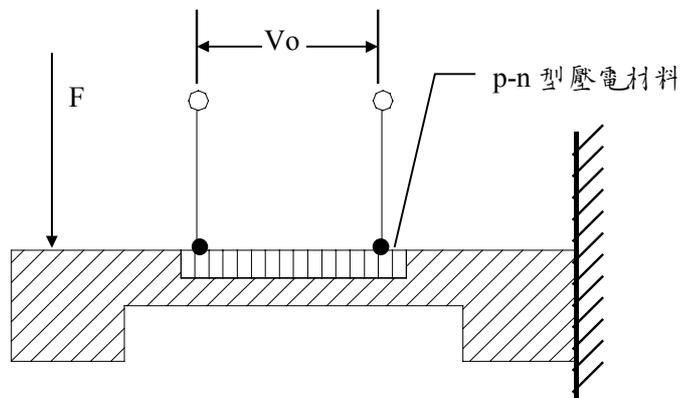


圖 2 荷重規內部結構

□ 壓力轉換器(pressure transducer)

壓力轉換器的工作原理主要是利用壓阻效應，內部結構圖如圖3所示，由於壓電材料之線性區間與材料的製程有關，因此壓力轉換器在選用時最重要的規格就是欲量測的壓力範圍，不正確的量測範圍選用會造成取值錯誤，甚至會損壞感測器損壞，例如使用負壓式壓力轉換器量測高於表壓力 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 即會造成壓電材料鍍膜破裂。此外由於材料對於溫度之變遷有相當敏感之特性，因此在使用這類轉換器時也需注意溫度的變化，當溫度變化太過劇烈時易造成材料的老化，或是取值不正常。

工業用的壓力轉換器多半都會將線性化電路及放大電路整合在一起，而使用者所接觸到的都是有封包的產品，這些產品的輸出除0-5V電壓訊號外，還有0-20mA電流訊號兩種，只需接上顯示器就能使用。

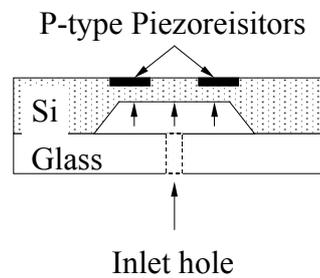


圖 3 壓力轉換器內部結構

□ 金屬薄膜式壓力感測元件

金屬薄膜式壓力感測器的工作原理是利用物體受力作用後，應變規所產生的電阻變化量正比於長度的變化量。圖4即為金屬薄膜式壓力感測器的結構示意圖。最底部為基材，亦即不鏽鋼，其表面經由機械、化學等方法研磨、拋光處理成鏡面，再經由一系列的清洗流程，使表面達到清淨化，才能開始正式的鍍膜程序。

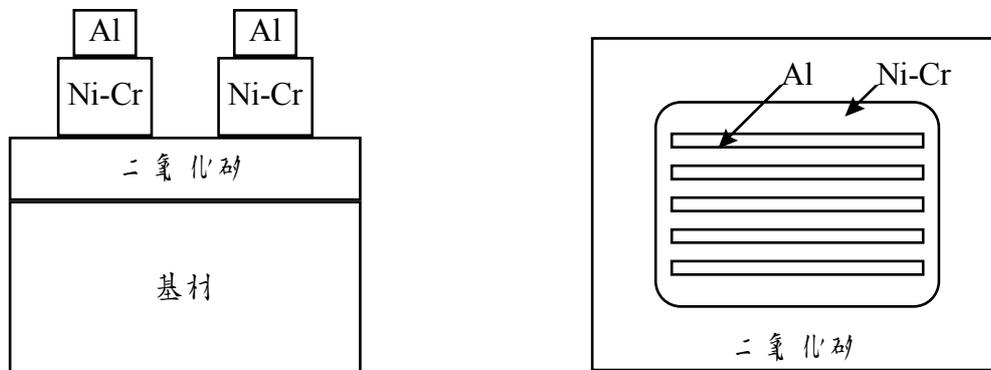


圖 4 金屬薄膜壓力計之結構示意圖

基材上的第一層為二氧化矽膜，厚度約 $1\sim 2\mu\text{m}$ ，其作用為電氣絕緣，一般是利用化學蒸鍍法CVD來製備。第二層則是金屬或合金電阻膜，其厚度與感測器的材料、圖案設計及整體架構皆有關，作為壓力感測層，亦即主要工作層，其製作方式可採用真空蒸鍍法、濺鍍法。第三層為金或鋁膜，其作為訊號檢出的焊接墊層。最後則以二氧化矽或高分子膜覆蓋，做為隔絕外界環境的保護層。

壓力感測元件應用不同的工作原理可以製成以下七種形態的壓力感測器，各種壓力感測器的特性比較如表2所示。

表 2 壓力感測器比較表

壓力感測器種類	工作原理	最大壓力	基板材料	感測部份	製程技術
金屬箔粘貼式	金屬箔應變	2000 kg/cm	不鏽鋼	金屬箔	應變計粘貼
金屬薄膜式	薄膜應變	2000 kg/cm	不鏽鋼	金屬薄膜	薄膜蒸鍍
多晶矽薄膜式	壓阻效應	2000 kg/cm	不鏽鋼	多晶矽膜	薄膜成長
擴散半導體式	壓阻效應	10 kg/cm	矽半導體	擴散膜	擴散
多晶矽半導體式	壓阻效應	10 kg/cm	矽半導體	多晶矽膜	薄膜成長
III-V族半導體式	壓阻效應	10000 kg/cm	III-V族半導體	金屬薄膜	薄膜蒸鍍
厚膜式	厚膜應變	1000 kg/cm	陶瓷材料	印刷厚膜	厚膜印刷

經過以上的討論我們可以瞭解到，不論是負荷計、應變計、壓電感測器、甚至是加速規等常用的感測元件所運用的原理不外是壓電效應或是壓阻效應，因此輸出的訊號模式也不外乎是電壓、電流訊號，需要再經過轉換、補正才能使用。

### 三、負荷計應用實例

在CNS工地用安全帽的標準裡，共要測定耐衝擊性、耐穿擊性、帽邊強度測試、耐電壓性、耐燃燒性、吸水性與重量測試七項。其中帽邊強度試驗機設計的目的，在於測量安全帽橫向的剛性，代表了安全帽帽邊在受到外力撞擊時所能提供的安全保護指標。

由於測試方式和精確度都要能夠符合CNS以及ISO之測試標準，因此在設計實驗平台時必需考慮到平台的整體剛性、施力精確度、與外力進給速率。以CNS所規範的測試標準而言，施力的精確度須達到500公克以下，進給速率為 $1.2\text{mm} \pm 0.3\text{mm}/\text{min}$ ，因此荷重進給裝置的設計是利用蝸齒輪與蝸桿達到大減速比的目的，而施力大小的量測由於施力的範圍為0~250公斤，精確度為500公克，因此一般機械式的量測裝置不論在空間、精度方面都不適合，故利用荷重規來量測，方能達到需求。圖5為帽邊強度試驗機之示意圖。

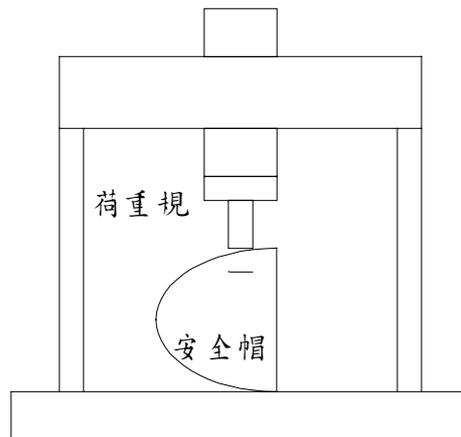


圖5 帽邊強度試驗機

#### 四、實驗設計

壓力感測元件的製程由於相當煩瑣，同時在設計上也有許多需要考量的細節，因此市面上能購買到的壓力感測元件其型式均固定，以本單元所介紹的荷重規而言，其種類依照外型及量測範圍可分成八種類型，除了一般用來量測重量的空心樑荷重規外，還有可以量測動態張力的S形荷重規、量測徑向壓力的環型荷重規、以及可以用來充當機械手臂觸覺感測器的鈕扣型荷重規等，各種不同的荷重規在安裝時均有不同的方式與需求，因此在選用荷重規時需考量的重點除了功能需求外，還需考慮到荷重規的外型與幾何尺寸，以及裝置方式。

##### □線性十字平台實驗設計

利用荷重規設計一套能夠量測線性十字平台導桿徑向壓力之系統線性十字平台（又稱作X-Y table），主要構成元件係由平台台面、直線軸承、滾珠導螺桿、致動器（馬達或油氣壓系統）、控制器、以及位置感測器所組成，線性十字平台主要的功能是提供X-Y方向精確的定位。一般的平台都是以閉迴路控制，利用位置感測器將背隙檢測出來並予以補正，然而當平台上所乘載物件重量過重時，並未設置感測器將荷重檢測出來，往往會造成Z方向之變形，甚至會造成導桿與螺桿之損壞。因此在本單元

之實驗設計中，請利用荷重規針對此一需求對線性十字平台作改良式設計，以提高其精確性。

在進行線性十字平台改良式設計之前，請先蒐集線性十字平台與荷重規之型錄、技術規格等相關資料，並由其中選定欲改良之線性十字平台與荷重規，同時也請先自行擬定一份操作流程。系統之需求除了能夠以荷重規量測出乘載物件重量之外，還包括極限荷重警示，動態荷重顯示，整體誤差需小於滿刻度之 $\pm 0.2\%$ ，同時也需考慮荷重規裝置位置與方式，以及訊號線之安排方式。

### 參考資料

1. Sedra, A.S., Smith, K.C., 1987. *Microelectronics Circuits*, Holt, Rinehart, and Winston.
2. Gardner, J.W., *Microsensors: Principles and Applications*, John Wiley & Sons.
3. 孫宗瀛、黃金定，82年。常用線性IC資料手冊，全華圖書。