

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：實習)

旋轉結構物振動量測技術之研究

服務機關：台灣電力公司
出國人 職 稱：機械工程師
姓 名：陳瑞麒
出國地區：日本
出國日期：92年8月7日至8月20日
報告日期：92年10月7日

93/09203630

行政院及所屬各機關出國報告提要

Cop 203630

出國報告名稱：旋轉結構物振動量測技術之研究

頁數 26 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：陳瑞麒/台灣電力公司/綜合研究所/

機械工程師/ (02) 26815424#2277

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：92年8月7日至8月20日 出國地區：日本

報告日期：92年10月7日

分類號/目

關鍵詞：汽機、振動量測、加速規

內容摘要：(二百至三百字)

綜合研究所刻正從事各項火力與核能電廠之汽機壽命評估及破損案件肇因評估，經常必須從事各類振動實驗以配合分析工作驗證之用，為精進技術及突破瓶頸，欲進一步進行旋轉結構物振動量測相關技術之研究工作，因此擬定此實習計畫，以便吸取國外廠家之經驗，藉以提昇本所的振動量測技術，希望能對各電廠之大修試驗工作提供更多項之服務。

本計畫之目的在學習國外廠家對汽機振動之量測技術與經驗，藉以供本所在處理振動量測技術之參考，重點在於旋轉結構物振動量測的相關技術，包括量測轉軸、葉片等之振動訊號。本報告內容針對壓電型感應器之原理、KISTLER公司的各型加速規、如何選擇加速規及 KISTLER 公司的壓電型應變計等作一簡述，最後作成感想及建議。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.gsn.gov.tw>)

目 錄

	頁數
一、前言 -----	1
1.1 出國目的 -----	1
1.2 出國行程 -----	1
二、實習內容 -----	2
2.1 KISTLER 公司簡介 -----	2
2.2 壓電型感應器之原理 -----	2
2.3 各型加速規 -----	4
2.4 如何選擇加速規 -----	6
2.5 壓電型應變計 -----	8
三、感想及建議 -----	11
附圖 -----	12

一、前言

1.1 出國目的

綜合研究所刻正從事各項火力與核能電廠之汽機壽命評估及破損案件肇因評估，經常必須從事各類振動實驗以配合分析工作驗證之用，為精進技術及突破瓶頸，欲進一步進行旋轉結構物振動量測相關技術之研究工作，因此擬定此實習計畫，以便吸取國外廠家之經驗，藉以提昇本所的振動量測技術，希望能對各電廠之大修試驗工作提供更多項之服務。

本計畫之目的在學習國外廠家對汽機振動之量測技術與經驗，藉以供本所在處理振動量測技術之參考，重點在於旋轉結構物振動量測的相關技術，包括量測轉軸、葉片等之振動訊號，由於被測物處於旋轉狀態下，因此量測工作倍增困難，但也提高其真實性，更有助於有限元素法分析驗證之用。

1.2 出國行程

92/8/7

台北 → 日本東京

92/8/8~92/8/19

於 KISTLER 公司實習旋轉結構物振動量測技術之研究

92/8/20

日本東京 → 台北

二、實習內容

2.1 KISTLER 公司簡介

KISTLER 公司以生產感應器 (sensor)、量測儀器為主，如圖 1 所示，應用領域包括：引擎業、汽車業、製造業、塑性加工、生物力學、加速度量測及其他相關附屬設備等。其所生產的感應器以壓電材料型 (piezoelectric material) 為主，有別於應變規型 (strain gauge)，生產的感應器包括力規、壓力規及加速規三大類，此次出國的目的是實習旋轉結構物的振動量測技術，因此焦點放在加速規上。

KISTLER 公司加速規的應用範圍頗廣，包括結構測試、航空、軍事、汽車運輸、土木工程、環境應力測試等，如圖 2 所示。以下章節即針對壓電型感應器之原理、KISTLER 公司的各型加速規、如何選擇加速規及 KISTLER 公司的壓電型應變計等作一簡述。

2.2 壓電型感應器之原理

壓電材料具有一種特性，當其受力時會產生電荷 (charge)，力和電荷成正比關係，這種效應稱為壓電效應 (piezoelectric effect)。由於壓電材料為非等向性材料，因此依切割位置和方向的不同 (如圖 3 所示) 而有不同的效果產生 (如圖 4 所示)，第一種為縱向效應 (longitudinal effect)：當壓電材料受壓力時在受力面的兩側產生電荷，第二種為橫向效應 (transverse effect)：當壓電材料受壓力時在垂直受力面的兩側產生電荷，第三種為剪力效應 (shear effect)：當壓電材料受剪力時在受力面的兩側產生電荷。

目前全世界被廣泛採用的壓電材料主要有壓電陶瓷材料 (piezoceramics) 和石英 (quartz) 兩種，石英是單結晶體，其感度較壓電陶瓷材料低，較適合用於力規和壓力規，但石英穩定性高，其材料特性不易隨時間而變化，也沒有疲勞的問題，理論上其壽命是無限長，另外，石英的材料性質在 300°C 以下變化不大，如圖 5 所示，這

也是其優點之一。

壓電陶瓷材料通常以人工方式製成，因其感度高，適合做低振動及低頻的量測，故適合當作加速規使用。至於在高頻振動量測部分，壓電陶瓷材料和石英的差異性不大，但由於壓電陶瓷材料的共振頻率較高，因此其可量測的高頻範圍較大，量測值也較精準。然而壓電陶瓷材料的穩定性較差，其材料特性較易隨時間變化，在接受機械疲勞效應時容易產生零點漂移（zero shift）現象，而且其材料性質容易受溫度變化的影響，此即所謂的熱電效應（pyroelectric effect）。

壓電材料受力後產生微量的電荷，此微量電荷無法以一般的量測儀器量取，必須利用放大器將此微量電荷放大並轉換成電壓訊號，如此才便於量測。一般而言，放大器的型式有兩種：電子放大器（electrometer amplifier）及電荷放大器（charge amplifier）。電子放大器的基本電路圖如圖 6 所示，壓電材料受力後所產生的微量電荷經由電容轉換成電壓，

$$U_o = \frac{Q}{C_i + C_c + C_r} \text{-----(1)}$$

由上式可知，輸出電壓 U_o 會受電線電容 C_c 的影響，而電線電容 C_c 與電線的長度成正比，此為其缺點。在實際的應用上會將電子放大器與壓電材料一起放入加速規中，如圖 7 所示，如此即可淡化上述的缺點。雖然電子放大器可量測的頻寬及振幅範圍固定，但其價格較低，操作方便，經過運算放大器的阻抗轉換後成為低阻抗系統（low impedance system），即使在潮濕或污染的環境中，亦可使用一般的電線來連接加速規，且可使用較長的電線。電子放大器必須經由耦合器（coupler）來提供工作電源，如圖 7 所示，目前一般的頻譜儀均有提供直流電源的功能，因此即不需使用耦合器。

電荷放大器的基本電路圖如圖 8 所示，其輸出電壓為

$$U_o = -\frac{Q}{C_r} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{V_i} + \frac{C_e + C_t}{V_i \cdot C_r}} \text{-----}(2)$$

對一個理想的電荷放大器而言， $V_i = \infty$ ，(2)式即成為

$$U_o = -\frac{Q}{C_r} \text{-----}(3)$$

由上式可知，電線與壓電材料的電容值對輸出電壓並無影響，此為其優點。在實際的應用上是將電荷放大器與感應器分開，如圖 9 所示，這種方式的優點為：(1) 感應器可置於較高溫的環境下，不必受限於放大器的電子零件耐溫問題，(2) 配合量測狀況，量測的頻寬及振幅範圍可由電荷放大器來切換，可將壓電材料的長處發揮至極致。但相對的，其價錢較高，對連接電荷放大器與感應器的電線要求較高，必須是高絕緣與低雜訊的電線方可。

2.3 各型加速規

KISTLER 公司的加速規種類繁多，底下略述幾個主要的類型。圖 10 是壓力型的加速規，當加速規受振動時質量 m_s 也跟著振動，根據牛頓定律

$$F = m_s \times a \Rightarrow a = \frac{F}{m_s} \text{-----}(4)$$

質量 m_s 因承受加速度 a 而產生慣性力 F ，此慣性力 F 作用在石英壓電材料上，石英受壓產生電荷，經放大器轉換成為電壓訊號而輸出，此電壓訊號與慣性力 F 成正比，而慣性力 F 又與加速度 a 成正比，由此可知加速度 a 與輸出的電壓訊號成正比，以上所述為壓力型加速規的工作原理。

圖 11 是剪力型的加速規，石英壓電材料受剪力而產生訊號，加速度 a 與輸出的電壓訊號成正比，其工作原理與上述相同，KISTLER 公司將此型的加速規命名為 K-SHEAR。此型加速規的優點是：(1) 對基座應變量的靈敏度較他型加速規為低，(2) 具最低的熱電效應，亦

即當溫度變化時其輸出的電壓訊號變化不大。

圖 12 是 PiezoBEAM 型加速規，其內部主要有一條雙層樑形的壓電材料，其工作原理如圖 13 所示，當樑形壓電材料受到上、下方向的加速度而變形時，在樑形壓電材料上下兩側產生電荷，經由放大器輸出訊號；當樑形壓電材料受到旋轉的加速度而變形時，由於左右兩側樑形壓電材料的變形剛好顛倒，其上下兩側所產生的電荷，在同一側的左右兩邊極性相反、電荷量相等，因此互相抵銷，導致由放大器輸出的訊號為零。所以，此種加速規可以量測線性加速度，但不受角加速度的影響，且此型加速規內並無如前幾型所述的慣性質量 m_s ，因此重量較輕，可用於量測輕的結構物。

如果想同時量測線性加速度及角加速度則必須使用 TAP (Translational-Angular-Piezobeam) 型加速規，如圖 14 所示，加速規內部有 A、B 兩個樑形壓電材料，利用電路將 A、B 兩個訊號相加、減，當加速規承受線性加速度時，A、B 輸出相同的訊號，因此相加的電路有訊號輸出，而相減的電路無訊號輸出，所以相加的電路只能輸出線性加速度的訊號；當加速規承受角加速度時，A、B 輸出相反的訊號，因此相加的電路無訊號輸出，而相減的電路有訊號輸出，所以相減的電路只能輸出角加速度的訊號。利用這種方式，即可同時量測線性加速度及角加速度。

上述的各類加速規其所能量測的訊號頻寬範圍很大，最高可到好幾 kHz，但在低頻部分則有其限制，最低只可到 0.1 ~ 1 Hz，如果要做低頻，甚至是靜態的量測，則必須使用電容式加速規，壓電型和電容型加速規的頻率響應範圍比較如圖 15 所示。KISTLER 公司將此電容式加速規命名為 K-BEAM，其構造如圖 16 所示，上、下兩層是電極，中間層是一片質量，以彈簧片固定之，其間的間隙則充以氣體，具阻尼的效用，可使頻寬範圍內的頻率響應較為平順。當電容式加速規承受加速度 a 時，根據牛頓運動定律，中間層的質量 m 所承受的慣性力 F 為

$$F = ma \text{ -----(5)}$$

此慣性力 F 必須由彈簧片來承受，因此

$$x = \frac{F}{k} \text{ -----(6)}$$

k : spring stiffness

x : displacement

亦即加速規所量測的加速度 a 與質量 m 的位移量 x 成正比。假設一開始時中層質量與上、下層の間隙均為 d ，受力之後上、下層の間隙變為

$$l_1 = d + x \quad \& \quad l_2 = d - x \text{ -----(7)}$$

根據電容公式

$$C_1 = \frac{A\varepsilon}{l_1} \quad \& \quad C_2 = \frac{A\varepsilon}{l_2} \text{ -----(8)}$$

A : electrode area

ε : permittivity constant

由於間隙的改變，電容值 C_1 和 C_2 產生差異，造成內部電路中的電橋產生不平衡，因而輸出與加速度 a 成正比的類比電壓訊號。

慣性質量 m 的位移量因受到上、下兩層電極片的限制而產生保護作用，即使加速規突然受到劇烈的震盪，也不致使支撐慣性質量的彈簧片遭受過大的應力而破壞，圖 17 是圓形造型的慣性質量和彈簧片。電容式加速規這種上、下雙電容的構造，使得其輸出訊號不受暫態溫度變化而影響，此為其優點之一。另外，它不易受電場和磁場的影響，這在實際工業運用的環境中是一大優勢。

2.4 如何選擇加速規

一般而言，在選擇加速規時必須考慮下列幾個因素：

量測範圍 ($\pm g$)：被測物的振動量峰值不可超過加速規的量測範圍，如果不曉得振動量峰值大小，通常可設定為 $\pm 500g$ ，如果是量測旋轉機械，則可定為 $\pm 50g$ 。如果是使用外接式的電荷放大器，即使振動量峰值比預期的小，仍可利用電荷放大器來調整增益 (gain) 的大

小，以便獲取最佳的解析度。

感度 (mV/g)：也就是加速規的解析度，通常一個加速規的感度是固定的，如果被測物的振動量很小，就必須用感度較高的加速規，以便將輸出的訊號放大。通常加速規的最大輸出訊號是 $\pm 5V$ ，以一個感度 100 mV/g 的加速規而言，其所能量測的振幅範圍就是 $\pm 50g$ 。

頻率響應範圍：一個加速規所能量測訊號的頻率範圍有其限制，圖 18 是一個典型的加速規頻率響應圖，圖中波峰的頻率就是加速規本身的自然頻率，加速規頻率響應的上限即受其限制，而頻率響應的下限則是受加速規放大器時間常數的影響，能夠使用的頻率響應範圍就是曲線的水平部分。一般加速規感度的定義點是在 100Hz 或 159.2Hz (即 1 k rad/s) 那一點，而上、下限頻率則是以 $\pm 5\%$ 或 $\pm 3dB$ 來決定，如圖 18 所示。

操作溫度：量測環境的溫度不可超過加速規的工作溫度範圍，否則有可能造成量測上的錯誤，甚至造成加速規的損害。一般而言，高阻抗的加速規最高可耐到 250°C，而低阻抗的加速規最高只耐到 160°C。

絕緣：如果加速規置於待測物上有漏電情形產生時，會造成量測上的誤差，這種情況下最好選擇有絕緣外殼的加速規，或在加速規和待測物間加上絕緣墊片，如此便可解決漏電的問題。

加速規的質量：利用加速規來量測結構物的振動時，由於加速規本身具有質量 (包括跟著加速規一起振動的導線)，這會造成量測到的自然頻率產生些微的下降，此即所謂的質量負載效應 (mass loading effect)。一般而言，加速規的質量不可超過結構物的 10%，而在實際的做法上，先做第一次的頻率量測，然後將與加速規等重的質量附加上去，進行第二次頻率量測，如果兩次量測結果的差異量無法接受，就必須更換較輕的加速規。如果結構物的質量真的很輕，則可考慮非接觸式的光學量測儀器。

2.5 壓電型應變計

一般而言，一談到量應變就會聯想到應變規 (strain gage)，如圖 19 所示，它是利用導線電阻值改變的原理來做應變的量測，但應變規只能量測物體表面的應變，無法量測物體內部的應變。另外，如果欲量測的物理量是物體內部的力、壓力、加速度或其他物理量，有時無法直接從表面的應變量轉換取得。基於以上種種因素，KISTLER 公司發展了一種壓電型應變計，用以量測結構物內部的應變，它的優點是：

- 1、感度高。
- 2、結構堅固。
- 3、解析度低於 $10^{-3} \mu\epsilon$ 。
- 4、量測範圍與解析度的比值為 10^7 。
- 5、適用於惡劣環境，具過負載保護。
- 6、操作溫度可達 400°C 。

基於上述的優點，它可用於微小應變的量測，工業界機械零件應變的長期監控等方面。

圖 20 是縱向壓電型應變計的構造圖，這型應變計是用來量測縱向（軸向）的應變，其方式是在結構物內欲量測的位置挖一個小洞，直徑至少 9 mm，然後將應變計埋入其中，施以足夠的預壓力，以便能同時量測壓、拉應變。其工作原理是：當結構物產生變形時，應變計跟著同時變形，且應變量一致，因此應變計中的壓電材料（通常是石英）即因變形而產生電荷，經由放大器轉換成電壓訊號而輸出。

圖 21 所顯示的是將一縱向應變計埋設於圓柱形測試結構物中，依此簡單的狀態來進行電荷與應變量之間關係的推導，在此有幾個假設：

- 1、圓柱形測試結構物的直徑 D 必須遠大於應變計的直徑 d 。
- 2、壓電材料的直徑和長度必須遠大於應變計外殼的壁厚。

3、應變計必須在洞中施予適當的預力。

在上述的假設前提之下，假設有一外力作用於圓柱形測試結構物上，如圖 21 所示，則其所引起的軸向應變 ε_j 為

$$\varepsilon_j = \frac{F}{AE_b} \text{-----(9)}$$

E_b : modulus of elasticity of the test body

在上述假設 2 的條件下，此時壓電材料也產生同樣的應變，因此壓電材料的軸向應力為

$$\sigma_j = E_p \varepsilon_j \text{-----(10)}$$

E_p : modulus of elasticity of the piezoelectric element

從壓電效應的理論可推得壓電材料所產生的電荷量為

$$Q = A_i d_{ij} \sigma_j \text{-----(11)}$$

A_i : electrode surface

d_{ij} : piezoelectric coefficient

將(10)式代入(11)式即可得壓電材料所產生的電荷量與測試結構物應變量的正比關係

$$Q = d_{ij} A_i E_p \varepsilon_j \text{-----(12)}$$

依據 Hook's Law，測試結構物的應力為

$$\sigma_b = \frac{F}{A} \text{-----(13)}$$

將(13)式和(9)式代入(10)式即可得

$$\sigma_j = \frac{E_p}{E_b} \sigma_b \text{-----(14)}$$

假如測試結構物的材質是不銹鋼，則 $E_b = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ，壓電材料若為石英，則 $E_p = 8.7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ，代入(14)式可得 $\sigma_j = 0.4 \sigma_b$ ，也就是說，壓電材料上所受的應力比測試結構物所受的應力為小，因此可確保應變計不會過載。圖 22 為橫向應變計，可量測垂直於軸向的應變，圖 23 為三軸向應變計，可同時量測三個軸向的應變，其工作原理與前述相同，不再贅述。

由前面的敘述可知，應變計中的壓電材料必須施以預壓力，其原因是為了保持其線性度，這可由圖 24 來說明，此圖為應變計所受外力與輸出之關係圖，圖中的直線為理想狀況，但在實際應變計的結構中，各元件間的接合面並不是非常的平整，接合面間還是有微細且不均勻的間隙存在，當應變計開始受外力作用時，各元件間的接觸面積開始慢慢增加，到最後各元件間的接合面緊密的接合在一起，因此會有圖 24 中非線性的輸出產生，所以在實際的應用上均先施以一預力，以確保其輸出是在線性範圍內。另外，如果施以足夠的壓預力，則可同時量測拉、壓應變。

三、感想及建議

- 1.KISTLER 公司以生產壓電型的各類感應器為主，包括力規、壓力規、加速規及應變計等，以及各類相關的量測儀器及分析軟體，其產品廣泛應用於各種產業界。
- 2.KISTLER 公司的各種產品均經過嚴格的測試，包括溫度、濕度、壓力、疲勞、電磁波、衝擊、校準等，以作為其產品品質之保證，顯示出其敬業態度。
- 3.此次實習使吾人對壓電型加速規做一有系統的了解，清楚其各種性能、特性及限制條件，有助於將來進行相關振動試驗時實驗品質的提昇、機組特性的掌握等。
- 4.進行振動量測時加速規的選擇是重要關鍵之一，必須考慮現場的工作環境溫度、溼度、量測的頻率範圍、振幅大小、加速規的感度、是否需要絕緣、加速規的質量效應、擺設位置、固定方式等諸因素，缺一不可。
- 5.在進行單支汽機葉片的 free – free 模態測試時，如果葉片的質量較輕，則相對的必須使用質量較輕的加速規，以免加速規本身的質量影響汽機葉片的自然頻率太多。

Acceleration (static)



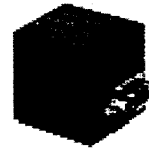
Vibration (dynamic)



Acoustic Emission



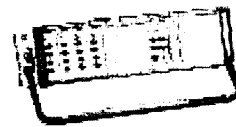
Triaxial (static & dynamic)



Impulse



Measure & Analyze



Accessories



圖 1、KISTLER 公司的產品

Remarkable lifetime under any condition.



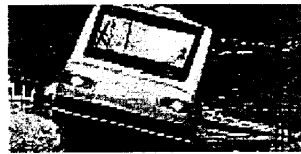
Precise, ultralow frequency, measurements are common using a K-Beam solution.



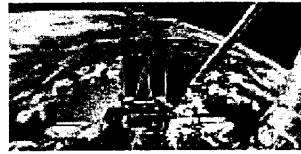
Modal studies easily accomplished using an array of inexpensive accelerometers.



Tilt and comfort controlled using K-Beam feedback.



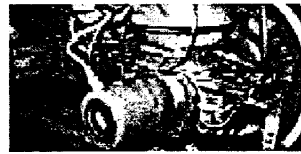
Space quality measurements are routine.



Flight safety issues measured accurately with K-Beam Family.



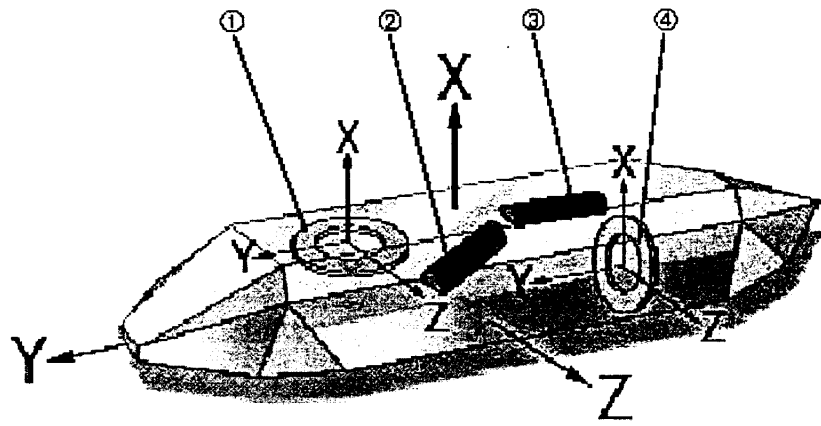
Harsh environments present negligible concern when using K-Shear accelerometers.



On site or factory calibration solutions available.

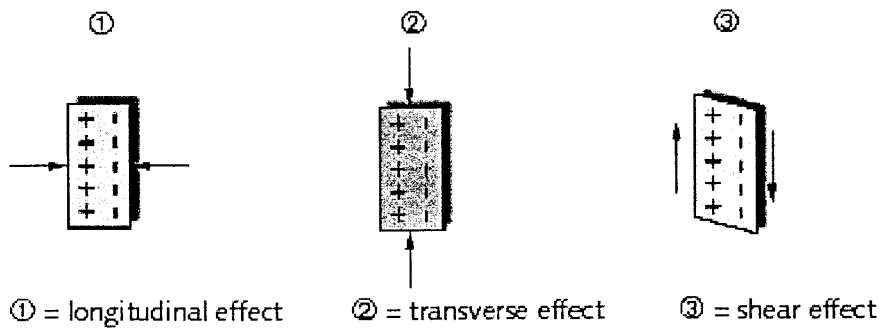


圖 2、KISTLER 公司加速規的應用範圍



- ① = compression cut
- ② = polystable cut
- ③ = transverse cut
- ④ = shear cut

圖 3、石英棒



- ① = longitudinal effect
- ② = transverse effect
- ③ = shear effect

圖 4、壓電效應

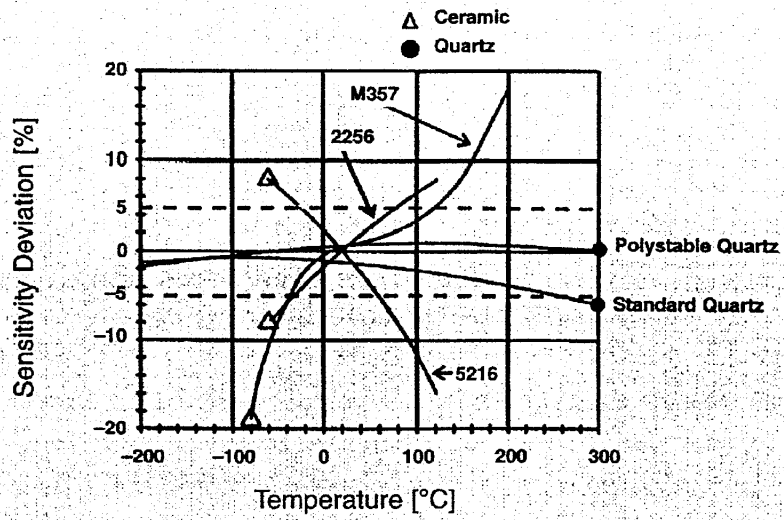
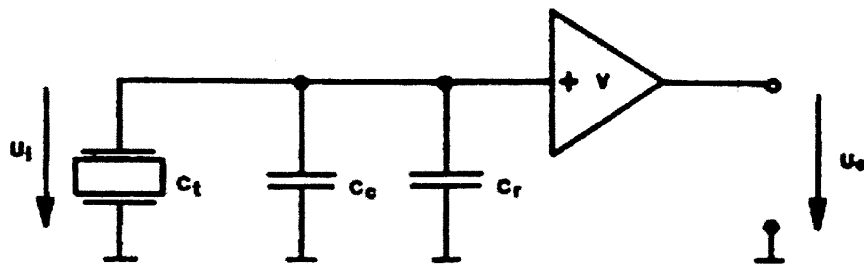


圖 5、各種壓電材料之感度與溫度之關係



Basic schematic of a measuring chain, using a quartz transducer and an electrometer amplifier.

C_t — Transducer capacitance

C_c — Cable capacitance

C_r — Range capacitor

v — Amplification of the electrometer amplifier.

圖 6、電子放大器的基本電路圖

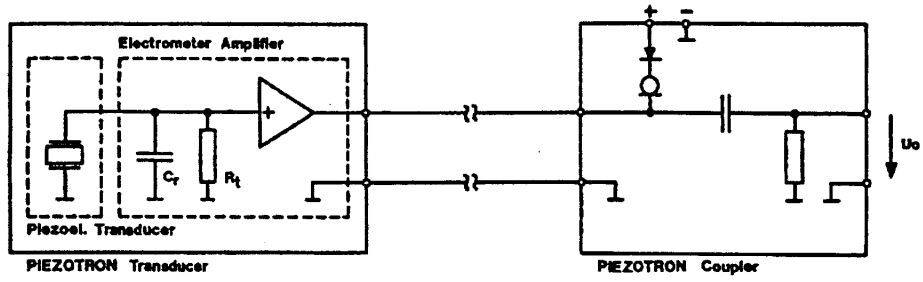
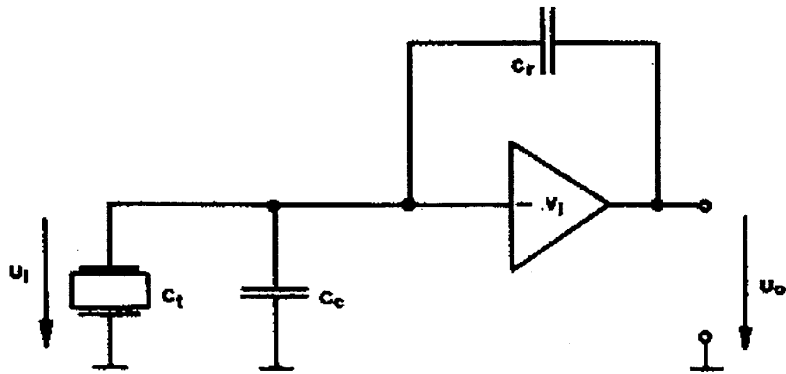
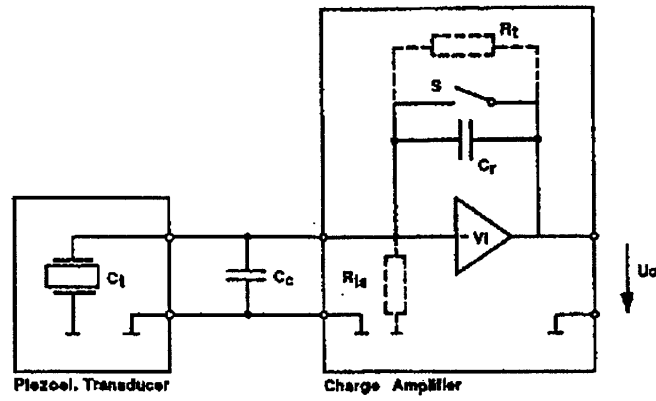


圖 7、PIEZOTRON 型換能器之電路圖



Basic schematic of a measuring chain using a quartz transducer and a charge amplifier
 C_t — Transducer capacitance
 C_c — Cable capacitance
 C_r — Range capacitor
 v_1 — Open loop gain of the charge amplifier.

圖 8、電荷放大器的基本電路圖



Circuit schematic of a measuring chain, using a piezoelectric transducer and a charge amplifier

- C_t — Transducer capacitance
- C_r — Range capacitor
- V_i — Open loop gain of the charge amplifier
- R_t — Time constant resistor
- R_{is} — Insulation resistance at the input

圖 9、電荷放大器的實際電路圖

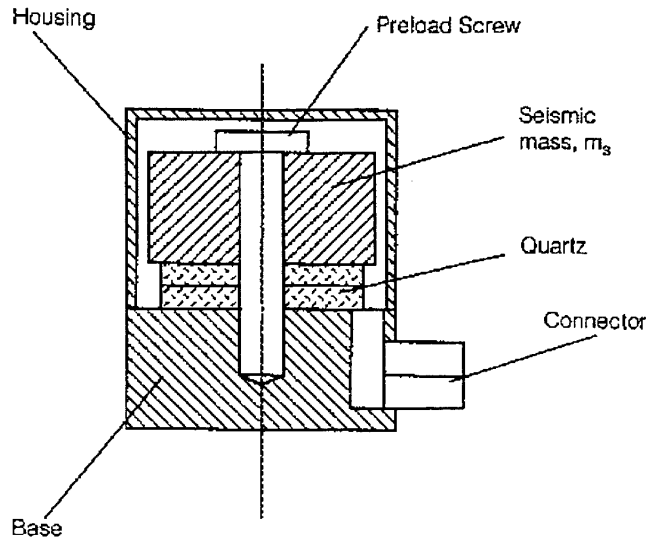


圖 10、壓力型加速規

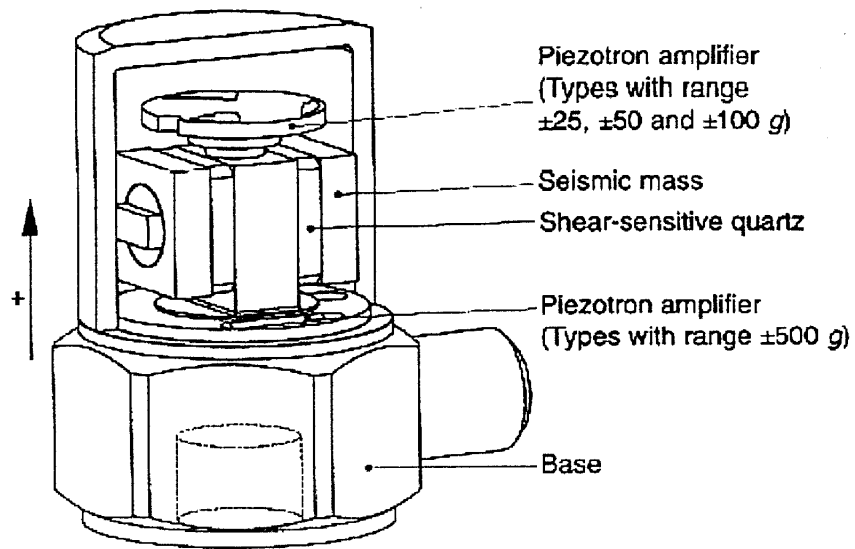


圖 11、剪力型加速規

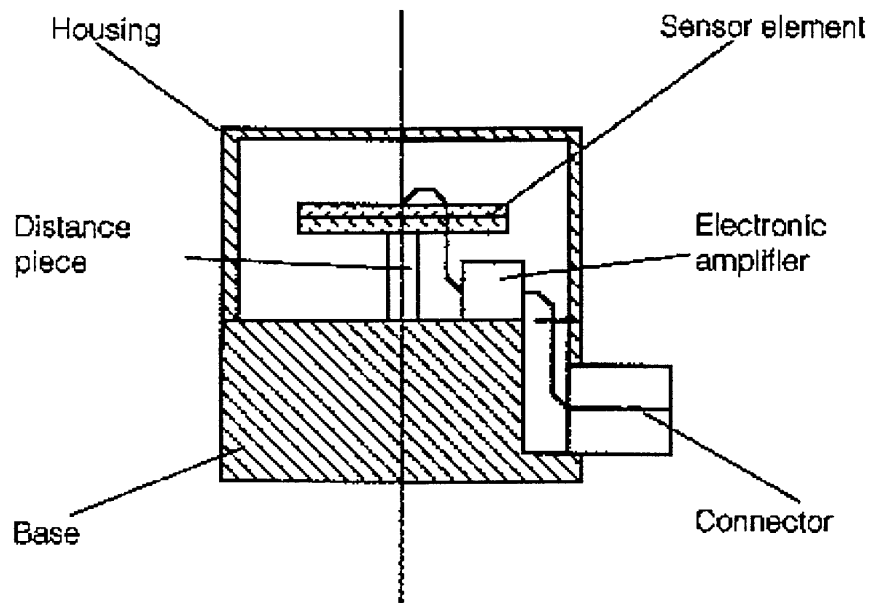


圖 12、PiezoBEAM 型加速規

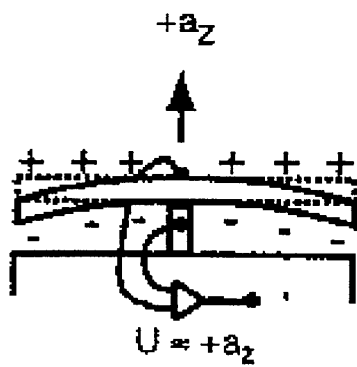


Figure a: The beam is bent due to the acceleration a_z upwards.

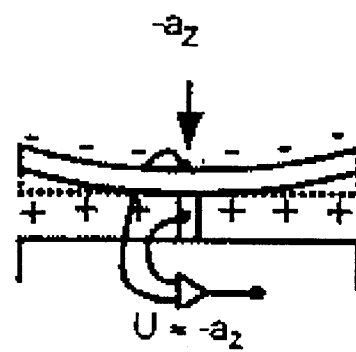


Figure b: The beam is bent due to acceleration a_z downward.

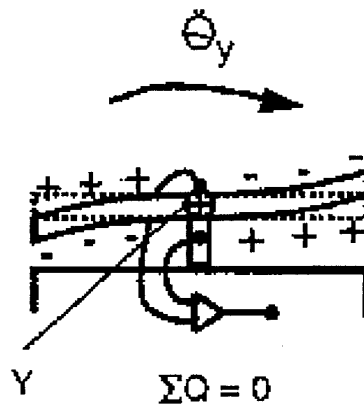
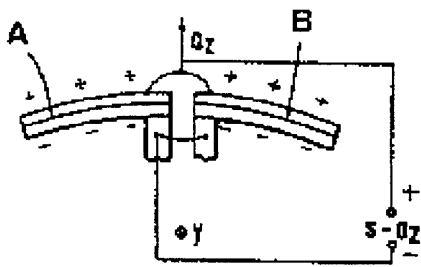
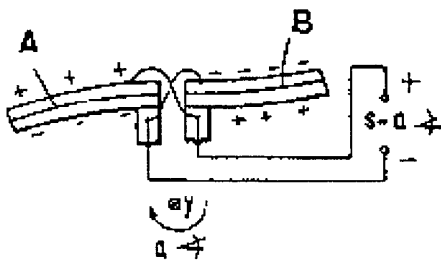


Figure c: Rotation of the sensing element around the Y axis

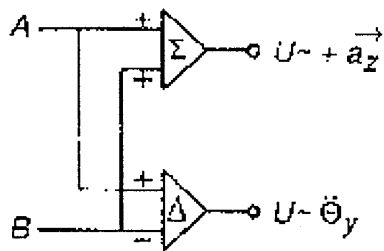
圖 13、PiezoBEAM 加速規的工作原理



Linear acceleration acting on the sensor.



Rotational acceleration acting on the sensor.



Circuit for measuring simultaneously translational and rotational acceleration.

圖 14、TAP 型加速規之工作原理

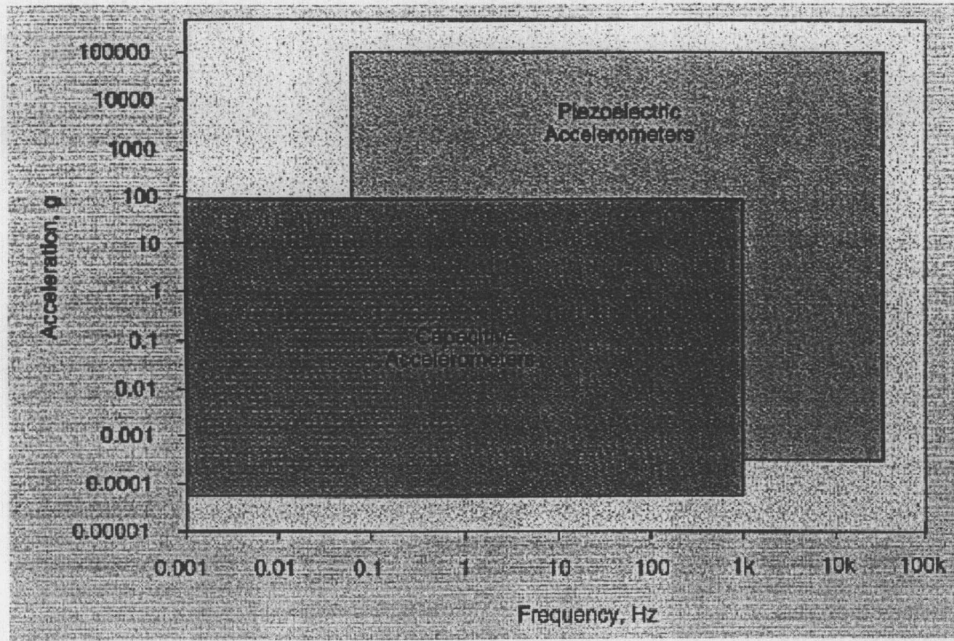
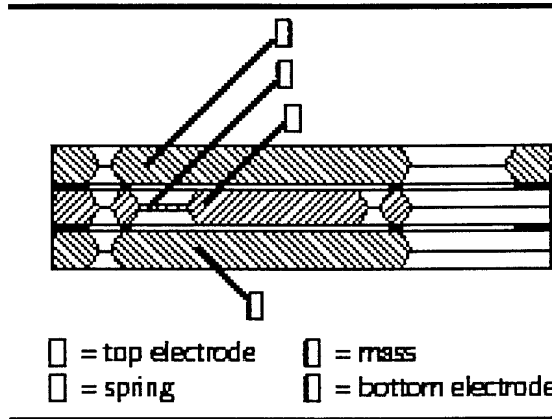
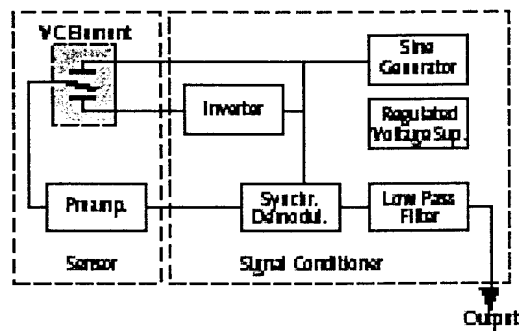


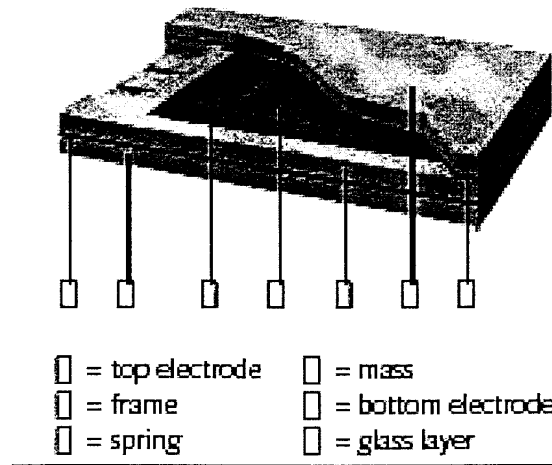
圖 15、壓電型和電容型加速規的頻率響應範圍比較



Typical capacitive accelerometer arrangement



Electrical schematic



MEMS variable capacitance accelerometer

圖 16、電容式加速規

Seismic mass, made up of a central suspension and electrode.



圖 17、圓形造型的慣性質量和彈簧片

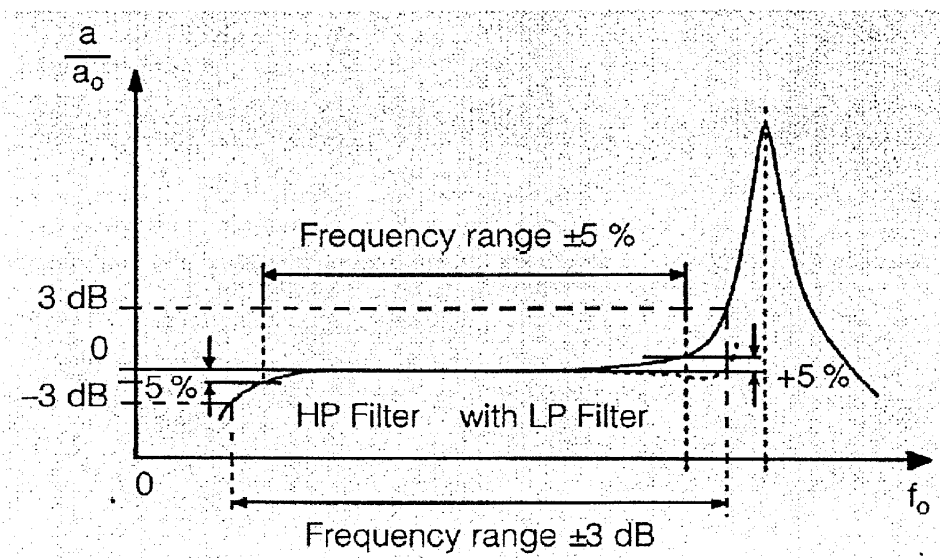
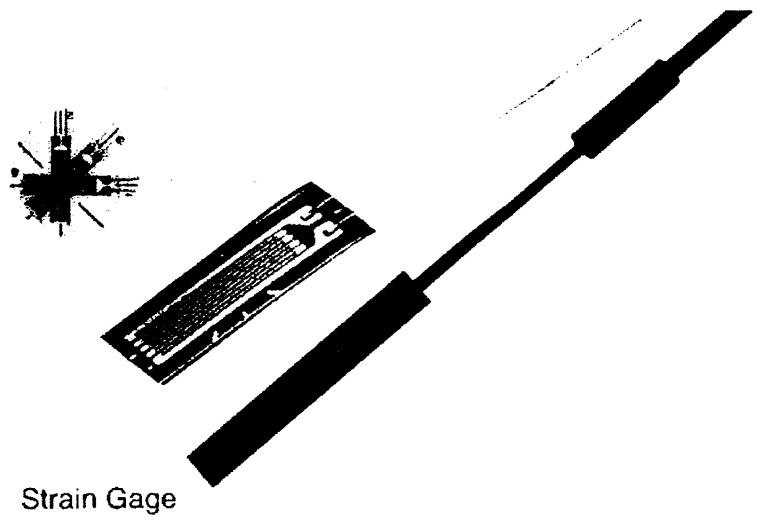


圖 18、典型的加速規頻率響應圖



Strain Gage

圖 19、應變規

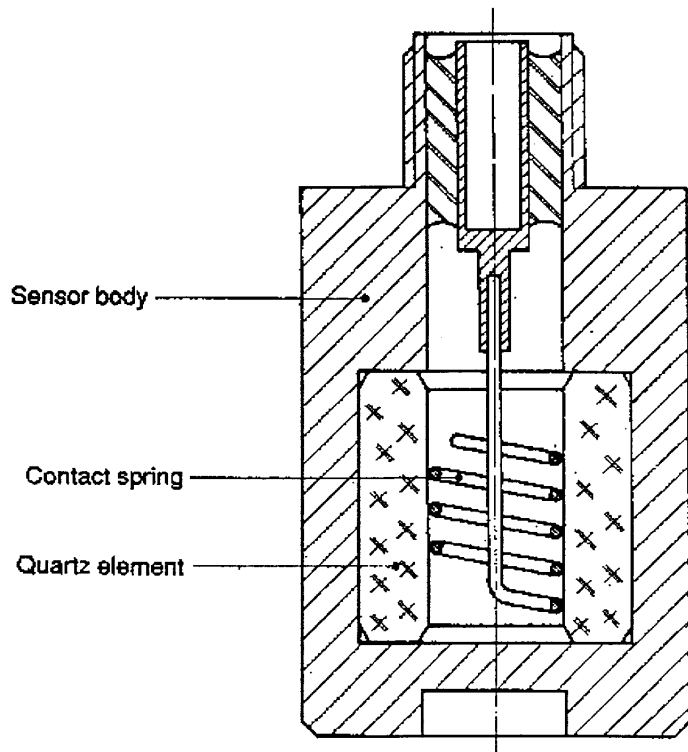


圖 20、縱向壓電型應變計構造圖

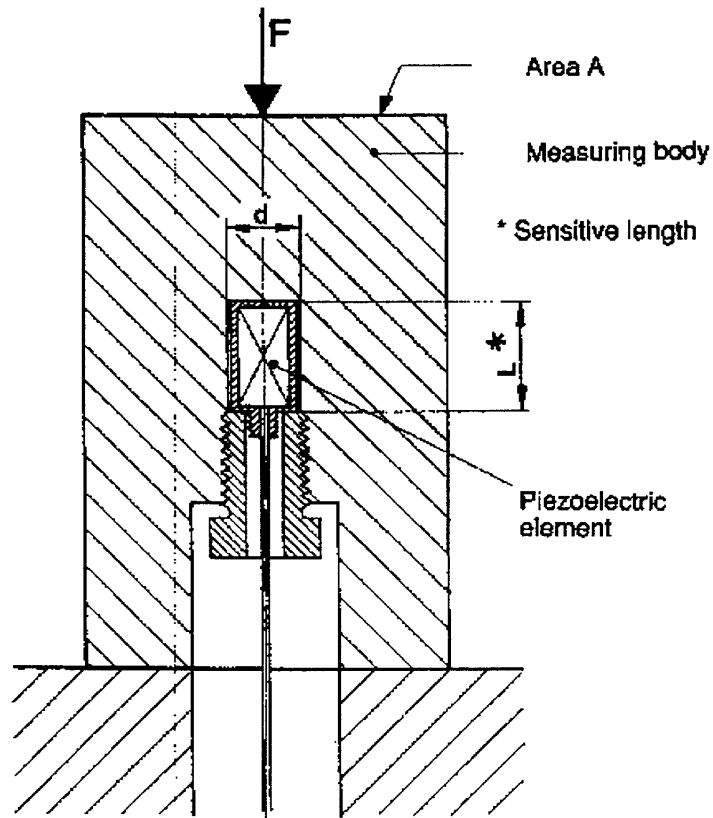


圖 21、縱向應變計埋設於圓柱形測試結構物中

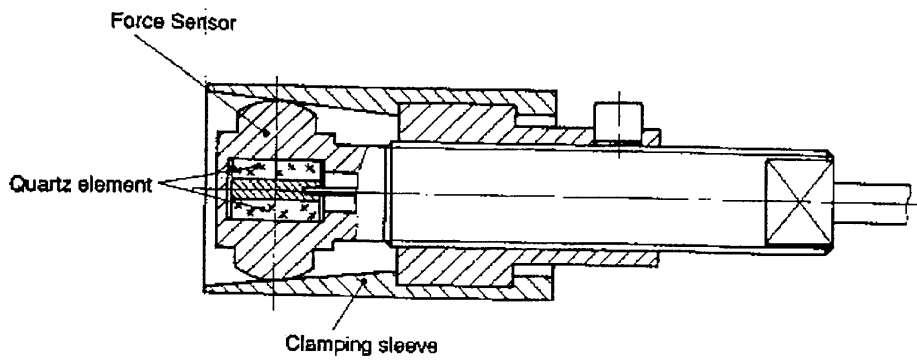


圖 22、橫向應變計

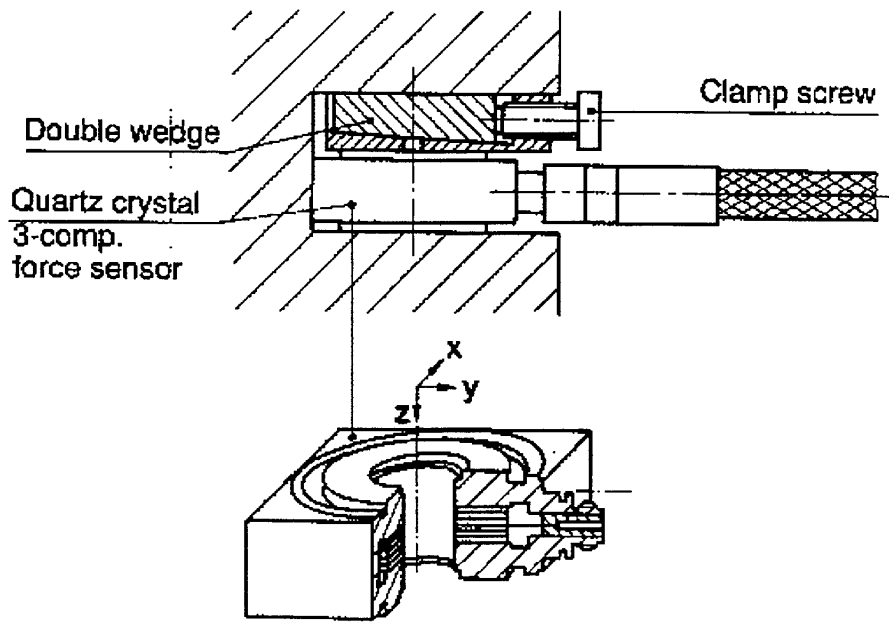


圖 23、三軸向應變計

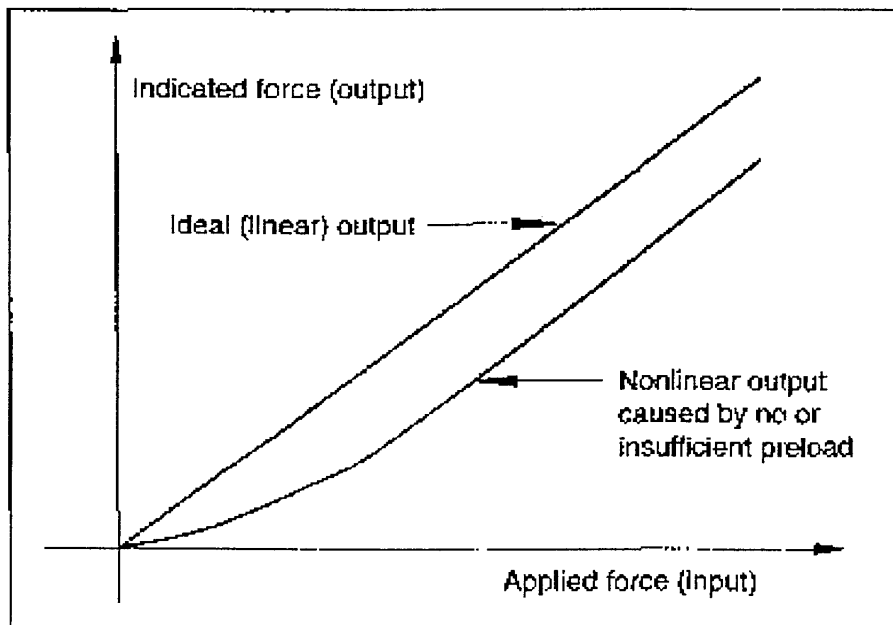


圖 24、應變計所受外力與輸出之關係圖