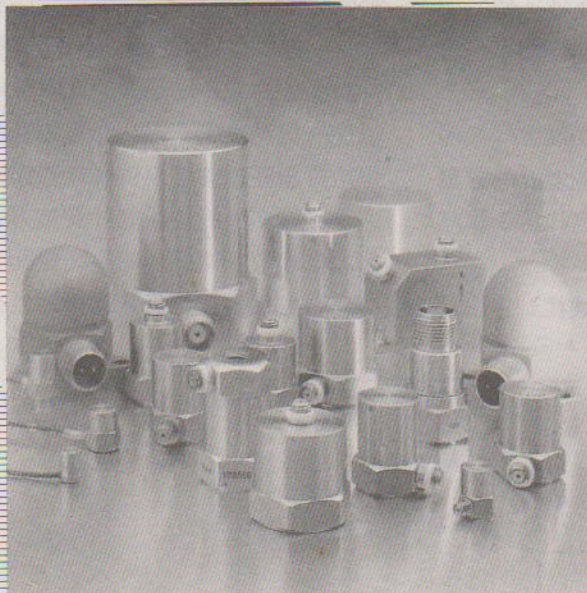




加速度計的 安裝方式

文／陳興



前 言

在量測結構體的振動信號時，最為人們常用的方式就是使用一種能量轉換器或稱作換能器（Transducer）的量測元件，使得結構體的機械運動能轉換成電能，然後再經由分析換能器輸出的電信號大小，來推算得到結構體的振動量（如：位移、速度或加速度）的大小。在振動量測中，依能量轉換器與結構體之間的距離通常可分為兩大類：一為非接觸式，另一為接觸式。所謂非接觸式能量轉換器量測元件，是指在量測振動體振動信號時，能量轉換器不與振動體互相接觸，例如：靠近振動體量測其位移的渦電流探頭（Proximity Probe, Eddy Current Type）、電容式探頭（Capacitor Probe）與光學式探頭（Photo Probe），或可在較遠距離使用的雷射儀來量測振動體的速度。非接觸式量測元件因其不與被量測體互相接觸，所以對被量測體沒有所謂的質量負載效應（Mass Loading Effect）以改變被量測體的動態特性，這對於在量測輕質量結構體振動時是一個較佳的選擇。接觸式能量轉換器則是將量測元件直接安裝於振動體表面以量測振動，加速度計（Accelerometer）即是屬於此一類型。加速度計基本上可概分為壓電式（Piezoelectric）與壓阻式（Piezoresistive）[1]，而其中壓電式加速度計因其使用頻率範圍廣、動態範圍大，如今已是最被廣為使用的一種振動換能器量測元件了。

當把加速度計置放於結構體表面時，如圖一，由於加速度計的輸出信號（電信號）是由加速度計本身的振動所造成的，



而非結構體振動所造成的。因此，在依工作環境與條件要求下，經適當選用加速度計後〔2〕，如何使結構體的振動經由接合介質忠實地被加速度計本身的振動所描述，以獲得結構體最真確的振動信號，則是本篇的主題——如何適當的選擇加速度計安裝方式。因為，即使購買了最好的，最適當的加速度計，然而卻有可能因安裝方式的不當因而改變了加速度計有效的頻率量測範圍與動態範圍，影響量測振幅與相位的準確性。

為了使加速度計量測到最準確的結構振動信號及發揮其最佳功能，使用者基本上必須遵守以下準則〔1、3〕：

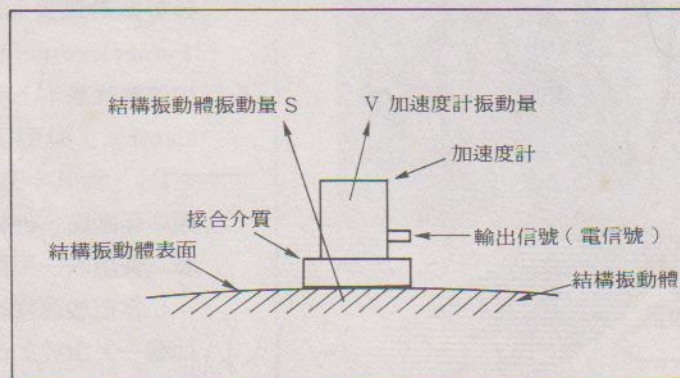
- 一、在結構體接合安裝的位置上，加速度計的振動必須儘可能地與結構體的振動互相一致；換言之，加速度計的安裝必須非常的穩固且儘可能有強大的剛性，使得加速度計的有效頻率範圍及動態範圍不因安裝的方式而被大幅度的限制。
- 二、結構體的振動不因安裝加速度計後而有顯著的改變；換言之，加速度計的質量及接合介質的質量兩者之和應比待測試結構體的質量儘可能的小。
- 三、量測點位置應可重複地被找到，以保

證重複量測，作為未來的驗證工作。

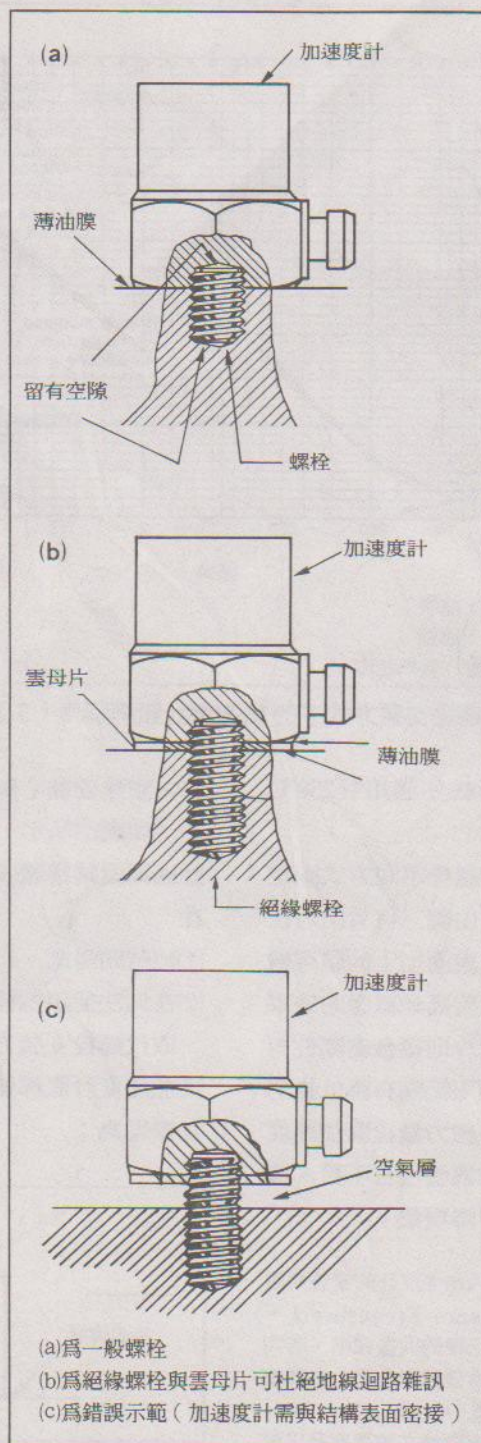
四、不因安裝本身的原因導致加速度計的信號被扭曲。

加速度計的安裝方式

在討論不同的加速度計安裝方式之前，且讓我們考慮兩種極端不同的加速度計安裝情況：在加速度計與結構體之間所加入的接合介質，可說是另一個多加入的系統，如果其剛性為無限大，則基本上加速度計的振動與結構體的振動可說是相同一致的（在加速度計有效的頻率範圍內）；但如果接合介質為空氣亦即是將加速度計懸浮於結構體表面，在如此情況下加速度計的振動與結構體的振動則有天壤之別了，因為當結構體在振動時，加速度計幾乎將無動於衷。換言之，加速度計的振動信號完全無法代表結構體的振動信號。而實際的加速度計安裝方式，則是介於此兩種極端方式之間。但基本上若接合介質剛性愈大則加速度計愈能忠實地表現結構體振動信號。以下則就不同的加速度計安裝方式——來討論：螺栓、蜜蠟、磁座、雙面膠帶、黏膠接合劑與手握探針。最後另外亦對機械



圖一 加速度計置於結構振動體表面



圖二 使用螺栓安裝加速度計

式濾波器,地線迴路雜訊(Ground Loop Noise)與信號線安裝問題加以說明[3~4]。

一、螺栓安裝 (Stud Mounting)

如圖二所示,加速度計以螺栓固定於結構體上。圖二(a)為一般的螺栓,圖二(b)為絕緣式接合方式,使用絕緣螺栓並配以不導電的雲母片可以避免地線迴路雜訊 (Ground Loop Noise) 的產生。圖二(c)則為錯誤的示範,加速度計底部應與結構體表面密接。以螺栓固定加速度計的方式多應用在:

- (1)高頻振動量測。
- (2)高振動量量測。
- (3)長期振動監測。
- (4)高溫度下量測。

其優點為:

- (1)可得到加速度計的最佳性能。
- (2)易得到非常準確的重複量測點。
- (3)不會限制加速度計的溫度使用範圍。
- (4)可承受高振動量。

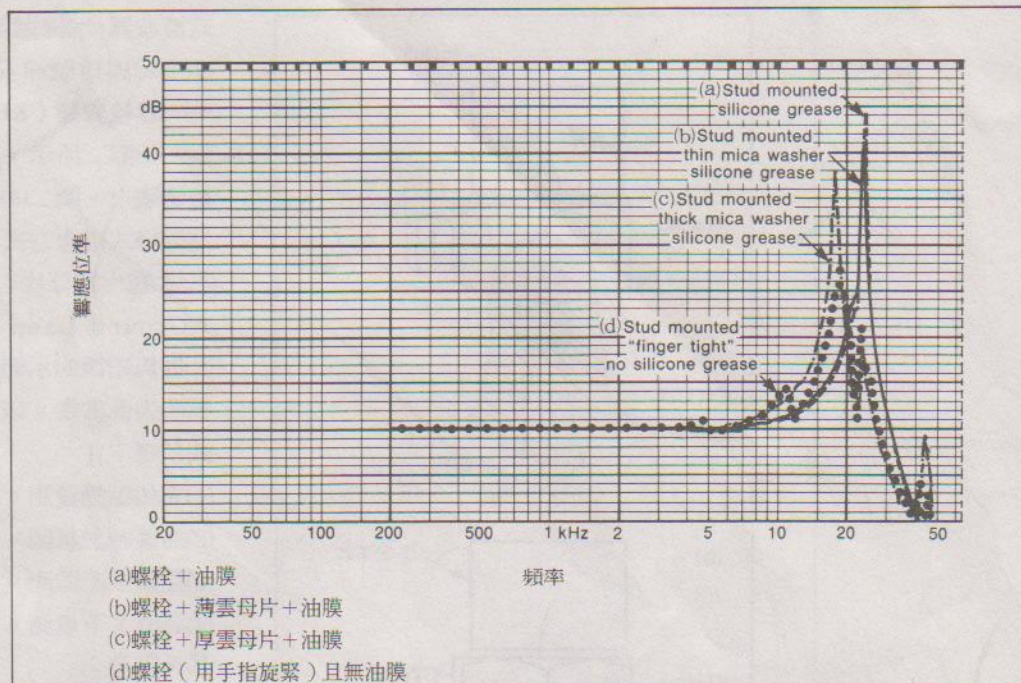
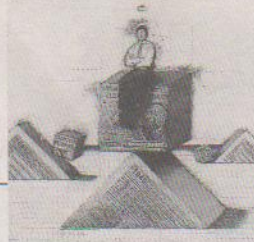
其缺點為:

- (1)因為鑽孔與攻螺牙,需花較長時間準備。
- (2)破壞結構體表面。

在使用此法時需注意:

- (1)結構體表面需經適當地加工處理以保持其安裝表面相當的平坦,且表面應保持乾淨。
- (2)在結構體內的螺栓孔必須足夠深,使得螺栓底部不會接觸到結構體,另外螺栓頂部亦不可接觸到加速度計,亦即螺栓頂端、尾端均留有適度間隙,且加速度計底部應緊密接觸於結構體表面。
- (3)螺孔方向必須為量測方面。

- (4)施用適當扭力於加速度計, M3螺栓為 0.6Nm, M5螺栓為 1.8Nm [1]。
- (5)雲母片必須儘量薄,以使加速度計有較



圖三 在使用些微差異螺栓安裝方式下的加速度計頻率響應 [3]

佳性能，同時雲母片較不適用於250°C以上高溫。

圖三為加速度計在螺栓不同方式固定下的頻率響應 [註]。由圖三可看出若在加速度計底部與結構體表面加上油脂可增加接合處的密合性有改善高頻響應的效果。但若使用過厚的雲母片則接合處剛性有降低現象，使得有效頻率範圍有降低趨勢。同時若只簡單地用手指力量旋緊加速度計，則因加速度計與結構體接合不良，高頻可用範圍有極明顯下降現象。

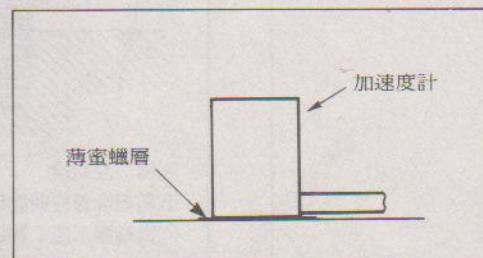
註：圖中尖峰值的頻率，稱為加速度計的安裝共振頻率，(Mounted Resonance Frequency)，是指加速度計與接合介質組合後的共振頻率，若加速度計的共振頻率愈高則其有效頻率愈高。在購買加速度計時其所附帶的校正圖 (Calibration Chart)，其上面所示的頻率響應圖是在加速度計以螺栓固定，並在標準校正程序下所得之值 [3]。

二、蜜蠟安裝 (Bee Wax Mounting)

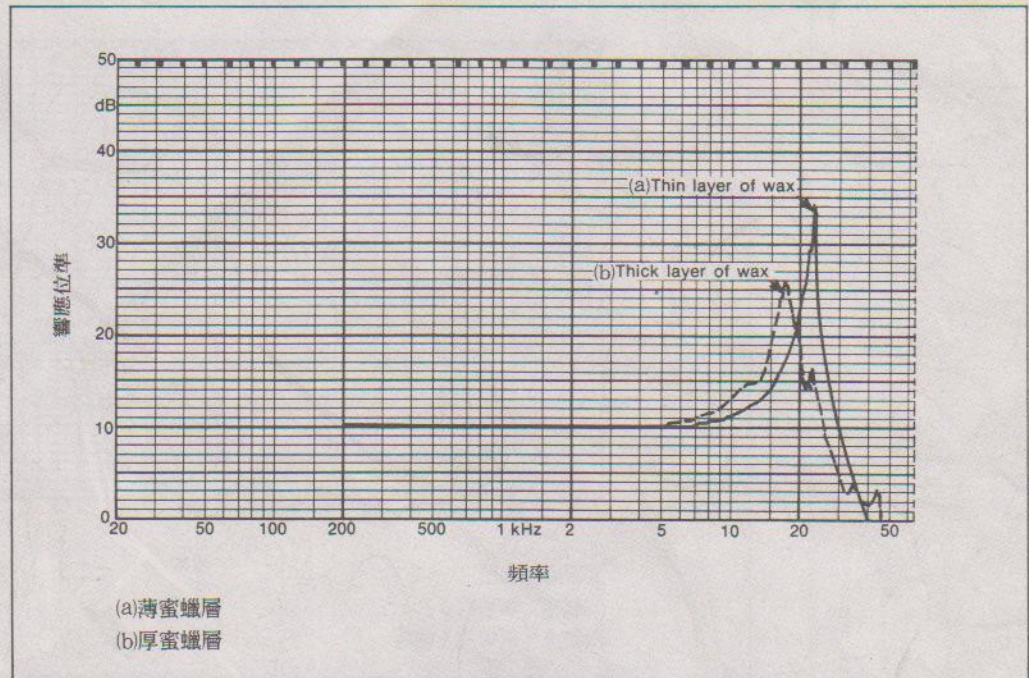
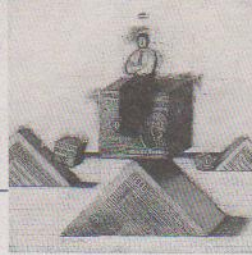
如圖四所示，將蜜蠟直接置於加速度計底部與結構體表面之間。此方法多應用在：

- (1)短時間量測。
- (2)在無法使用螺栓安裝方式時，可適當地取代螺栓安裝方式。
- (3)加速度計底部無螺牙孔設計時。

其優點為：



圖四 使用蜜蠟安裝加速度計



圖五 使用蜜蠟安裝下加速度計的頻率響應〔3〕

- (1)安裝快速且使用簡易。
- (2)其安裝固定共振頻率只稍低於螺栓固定方式的共振頻率。

其缺點為：

- (1)使用最高溫度約為 40°C ，不適合在高溫下的工業環境。
- (2)可承受最大振幅約為 100ms^{-2} 。
- (3)需多次練習以得到很薄且均勻的蜜蠟層，使得加速度計得到較穩固的安裝。
- (4)不易得到非常準確的重複量測位置。

在使用此法時，需注意

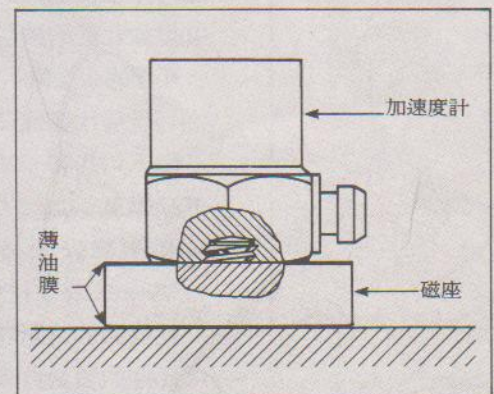
- (1)在加速度計所放結構體位置表面，必須清潔無油污，否則不易黏附，且表面應儘可能平滑。
- (2)蜜蠟層必須儘可能的均勻且薄，如果太厚則降低接合的剛性強度，使其安裝共振頻率顯著降低，導致有效量測頻率範圍

圍劇減，如圖五所示。

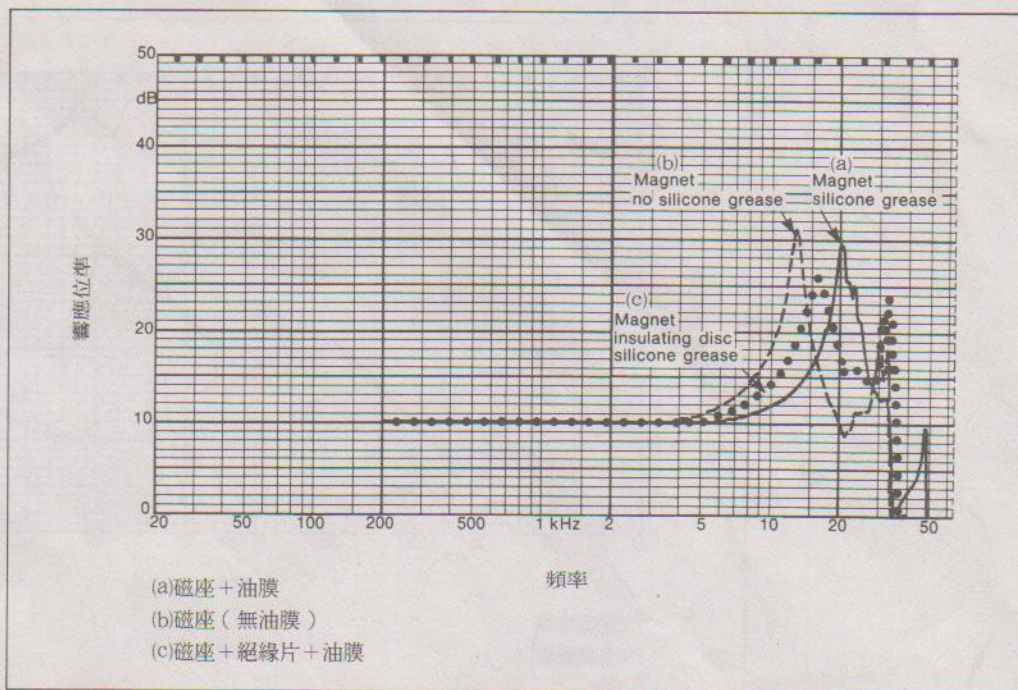
- (3)需注意環境溫度不可過高，否則將降低安裝共振頻率，且加速度計極易於結構體表面脫落。

三、磁座安裝 (Magnetic Mounting)

如圖六所示，永久性磁鐵固定於加速



圖六 使用磁座安裝加速度計〔3〕



圖七 在使用些微差異磁座安裝方式下的加速度計頻率響應 [3]

度計底部後，置於結構體上量測振動。此法可應用在：

(1)因其安裝極其容易，可用於初期探戡量測，藉此以決定永久振動監測位置。

(2)鋼鐵結構體振動量測。

其優點為：

(1)可非常快速的拆裝。

(2)以如此低的接合剛性而言，若安裝於較平坦的表面依然可得到較佳的高頻功能。

(3)可承受比蜜蠟安裝方法較高的加速度振幅，約 $1000 \sim 2000 \text{ ms}^{-2}$ 。

其缺點為：

(1)待測物表面必須為鐵磁性 (Ferro-Magnetic) 材料，或是一鐵磁性片狀物安裝於待測物表面。

(2)磁座的質量負載效應，可能改變待測物動態特性。

(3)其有效頻寬視磁鐵性強度而變。

(4)不易得到非常準確的重複量測。

在使用此法時，需注意：

(1)保持待測物表面清潔、無油污且儘可能平坦。

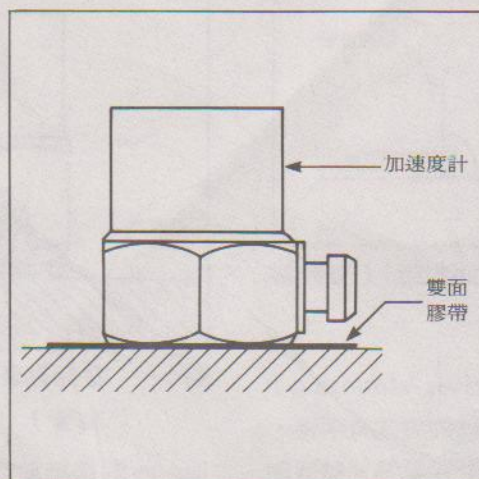
(2)在磁塊兩面加上油膜可增加接合性以改善高頻量測範圍，如圖七所示。

(3)可在磁塊底部加上絕緣片以杜絕地線迴路雜訊，但此時需注意，磁力將減弱，加速度計所能承載最大振幅將變小。

(4)待測位置厚度不可太薄，否則磁力將減弱且有較顯著的質量負載效應。

(5)因為磁塊所能產生的磁力為一定，因此當加速度計的質量增加時，磁塊所能承載的最大振幅將變小。

四、雙面膠帶安裝 (Double Sided Adhesive Tape or Disc Mounting)



圖八 使用雙面膠帶安裝加速度計

如圖八，雙面膠帶經撕去保護層後置於加速度計底部再黏貼於量測位置。此方法多應用在：

- (1)快速的振動量測。
- (2)加速度計底部無螺牙孔設計時。
- (3)對於不適用於鑽孔的待測物時，可取代螺栓安裝方式。

其優點為：

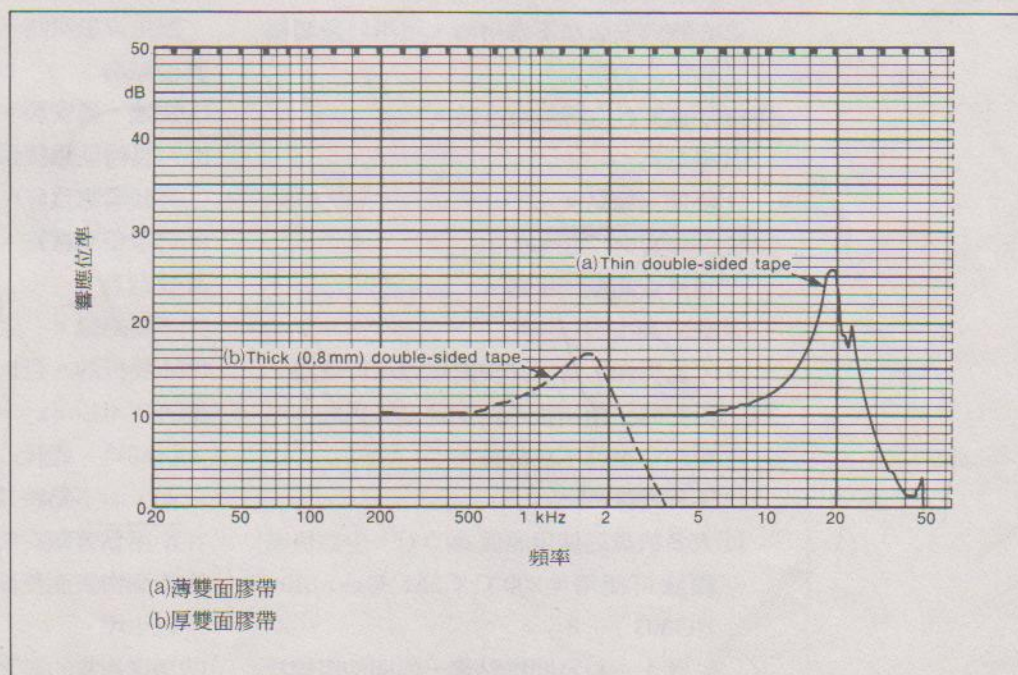
- (1)可避免地線迴路雜訊。
- (2)在此快速的安裝下，依然可得到合理的量測頻率範圍及承受稍大振幅。

其缺點為：

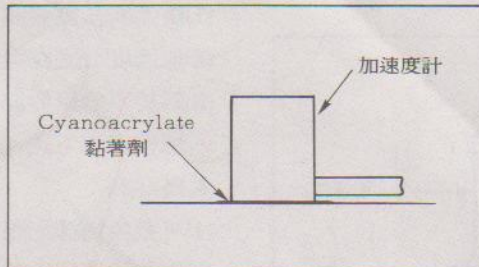
- (1)使用環境的高低溫限制。
- (2)不易得到非常準確的重複量測位置。

在使用此方法時，需注意：

- (1)保持待測物表面及加速度計底部表面的清潔及無油污。
- (2)儘可能使用很薄的雙面膠帶，因為膠帶若過厚則影響接合剛性，導致加速度計喪失高頻量測功能，如圖九。



圖九 使用雙面膠帶安裝下的加速度計頻率響應 [3]



圖十 使用黏著劑安裝加速度計（直接黏著）

五、黏著劑安裝（Adhesives Mounting）

基本上黏著加速度計的方式有兩種，一為直接黏著，另一為間接黏著。黏著劑則可為快乾膠液或Epoxy。圖十是為直接黏著（Direct Attachment），亦即使用快乾膠液（Cyanoacrylate）直接施於加速度計底部然後置於量測位置。直接黏著法多用在：

- (1)微小加速度計的量測振動。
- (2)在螺栓安裝法不適用時，可用於長期振動監測的量測。
- (3)加速度計底部無螺孔時。

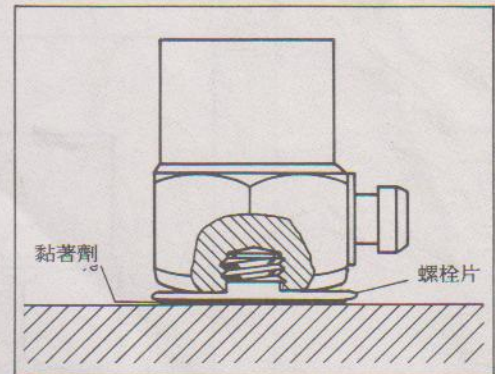
其優點為：

- (1)快速、簡易。
- (2)高頻響應良好。
- (3)可承受高振幅振動。

其缺點為：

- (1)不易拆卸，且拆卸後需加以清理乾淨。拆卸時必須用扳手將加速度計拆卸。
- (2)量測重複性不易掌握。
- (3)不易絕緣。
- (4)大多數最高使用溫度為80℃，少數快乾膠液可使用至200℃（3M Cyanolite HG303）〔3〕。

圖十一是為間接黏著，亦即使用螺栓片（Cementing Stud），將快乾膠液或



圖十一 使用黏著劑安裝加速度計（間接黏著）

Epoxy間接施於螺栓片底部，而不施於加速度計底部。然後將螺栓片置於量測位置，再將加速度計栓緊於螺栓片上量測結構振動。間接黏著法多用在：

- (1)需要重複量測，但無法使用螺栓安裝法時。
- (2)同一加速度計需作多點長期振動監測且需重複量測時。

其優點為：

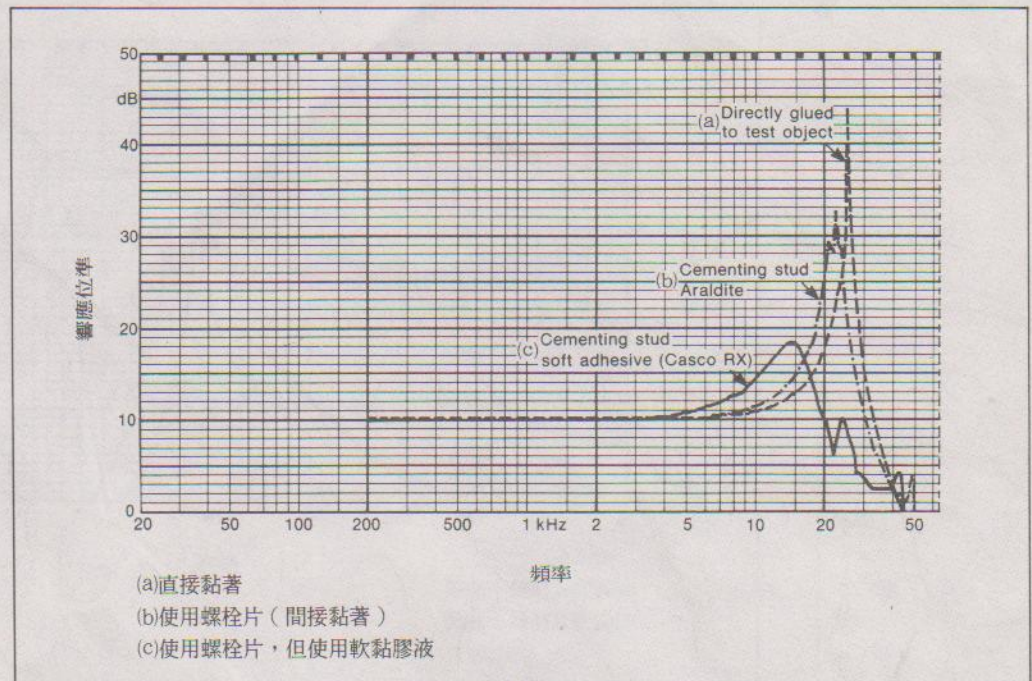
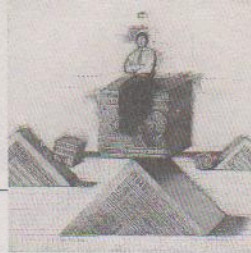
- (1)快速，易安裝。
- (2)可長時期重複量測。
- (3)高頻響應良好。
- (4)可承受高振幅。

其缺點為：

- (1)不易絕緣。
- (2)不易拆卸，且拆卸後需清理乾淨。
- (3)若使用Epoxy，則安裝時間較長。
- (4)拆卸時，螺栓片可能先脫落於結構體表面，而不易將其從加速度計底部除去。

在使用黏著劑安裝法時，需注意：

- (1)待測物表面量測位置應儘可能保持乾淨且平坦。
- (2)選擇適當的黏著劑，否則若使用不當的軟膠液則頻率響應高頻部分將變差，如



圖十二 使用黏著劑安裝下的加速度計頻率響應 [3]

圖十二所示。

六、探針式 (Probes)

如圖十三, 加速度計置於探針尾部, 並以手持探針量測加速度。此法多應用在:

(1)快速檢驗低頻量測結果。

其優點為:

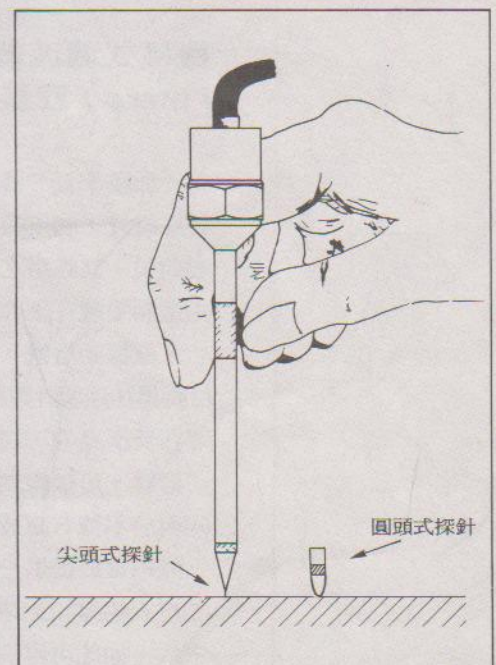
(1)最快速的加速度計安裝方式。

其缺點為:

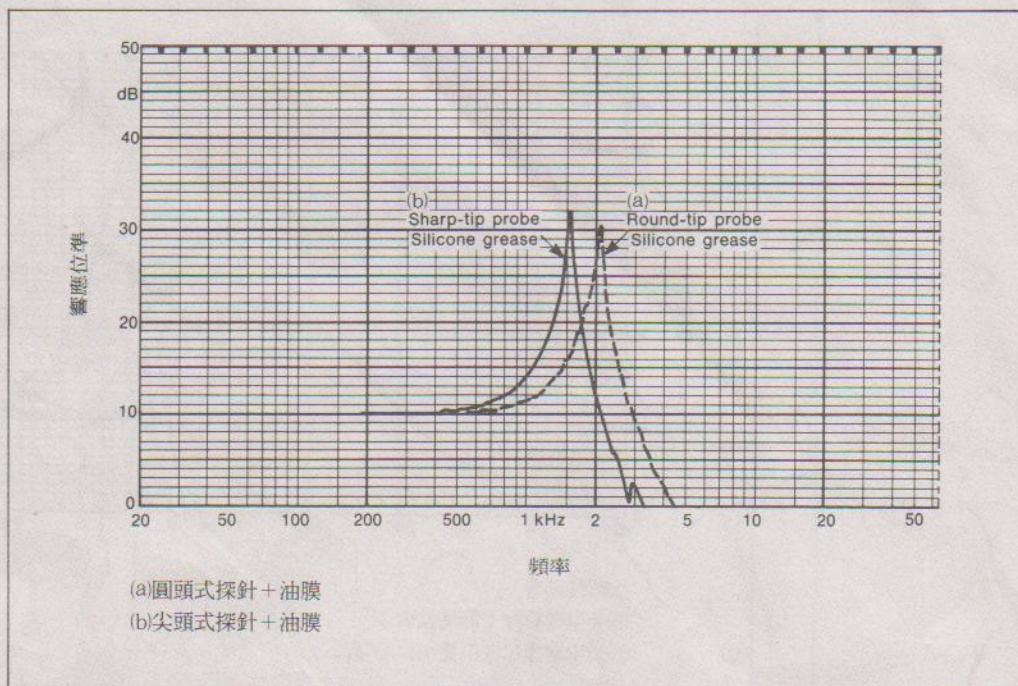
(1)固定安裝共振頻率降低很多, 易使量測結果錯誤。

(2)重複性很差。

在使用不同形式的探頭形式時, 可有不同結果, 如圖十四。其中以圓頭式探針可用頻率範圍較優於尖頭式探針, 但在使用此方法時必須特別的注意, 因為接合處的剛性極劇降低, 其量測結果只宜當作參考。



圖十三 手握式探針安裝加速度計



機械式濾波器 (Mechanical Filters) 安裝

如圖十五，裝於加速度計底部。經由特殊設計，利用機械式構造以達到高頻濾波效果。其應用之處與其優點為：

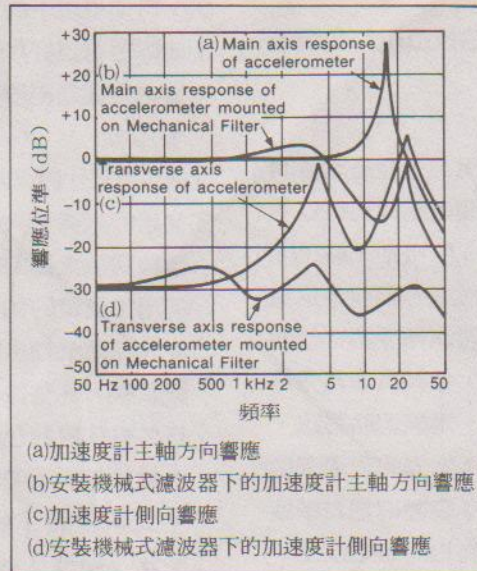
- (1)量測隱藏在高頻、高振幅信號內的低頻、低振動信號。
- (2)提供加速度計與結構體之間的絕緣介面。
- (3)在受很高的加速度振動時，因過濾高頻信號，可保護加速度計免於損壞。
- (4)對於不據有濾波器的電荷放大器，其功能相當於提供一個低通濾波器。
- (5)可大幅掃除加速度計側向振動影響，圖十六，如此可得到較準備確的加速度計主軸方向（單方向）振動信號 [3]。



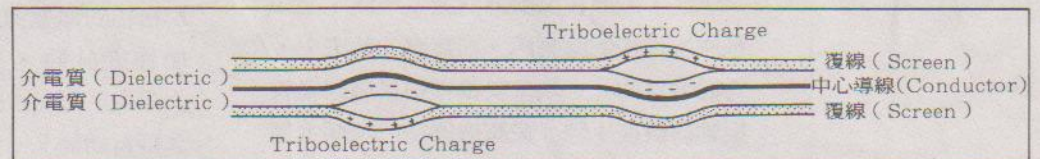
圖十五 機械式濾波器 [3]

信號線安裝

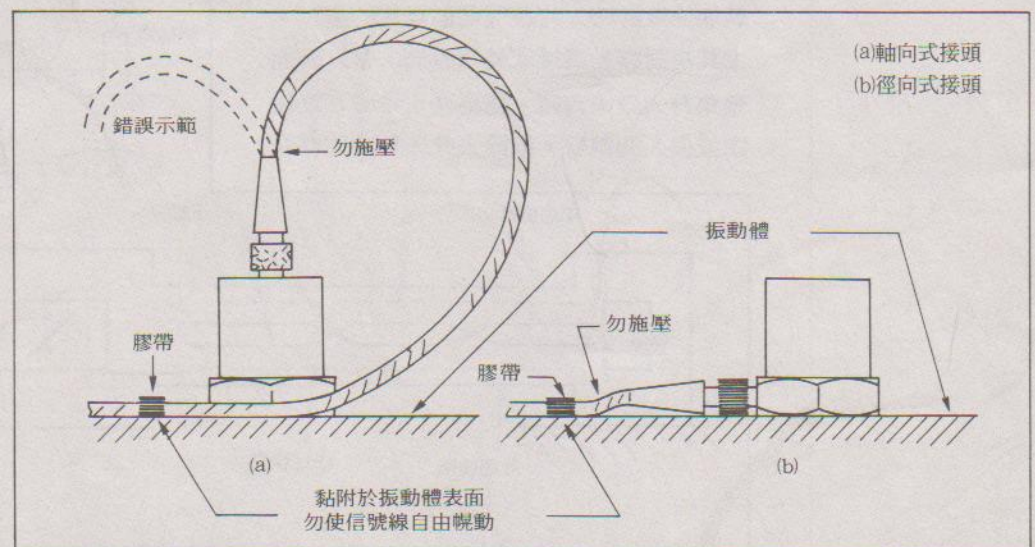
在使用加速度計量測振動信號時，最常見到的現象就是使用了不是良好的信號線時，如果將信號線搖擺幌動，此時就會在示波器上看到非常明顯的信號，然而此一信號卻不是由待測物的振動所造成的，而是因信號線的電容改變所引起的，同時



圖十六 使用機械式濾波器下的加速度計主軸與側向頻率響應 [3]



圖十七 信號線局部扭曲，產生電容變化因而產生 Triboelectric Charge



圖十八 加速度計信號線的安裝

此一現象稱為摩擦生電效應 (Triboelectric Effect) [3]。換言之，如果將信號線拉伸、扭轉、彎曲，均有可能造成信號線局部電容改變而產生干擾信號，圖十七。在實際量測中，如果信號線未能固定，而讓其自由擺動則會有摩擦生電效應因而產生雜訊。此一現象，在使用敲擊法量測高阻尼結構物時，就可很清楚的看到在結構振動衰減後，在示波器螢幕時間記錄的後半段依然有著一低頻信號在那擺動，此一低頻信號即是因信號線擺動所造成的。因此在使用加速度計量測加速度時，信號線可依圖十八固定，同時亦應避免信號線被過度的彎曲或扭轉。

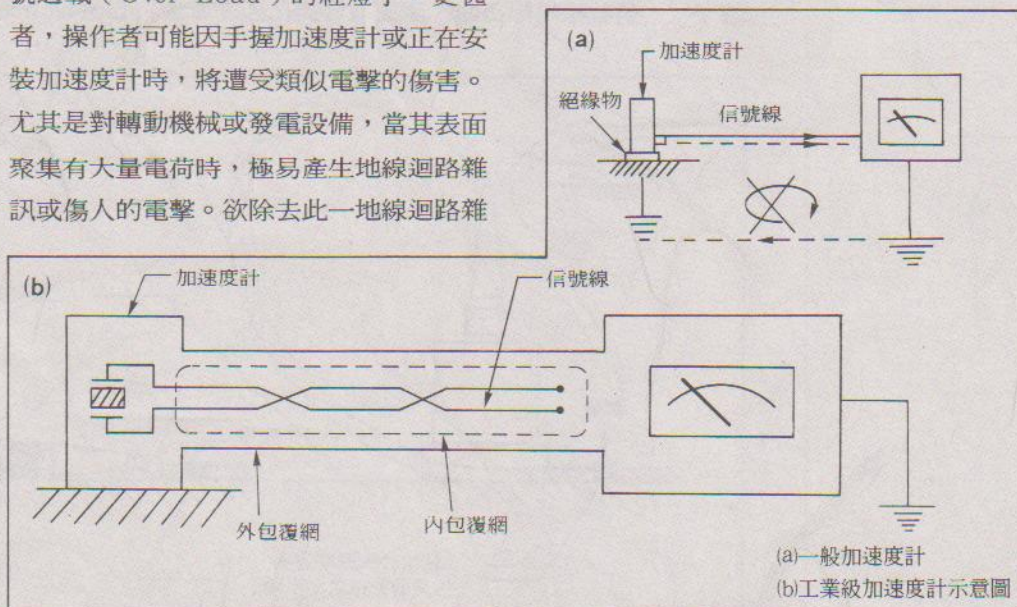


地線迴路雜訊 (Ground Loop Noise)

此種地線迴路的產生，主要是因量測儀器之間或與待測物之間兩處的電位差不同且有多點（至少兩點）的接地，結果因信號線的連接導致迴路形成，因而產生電流雜訊。然而此一電流雜訊卻隱藏在信號線中的結構振動信號內，並被誤認為亦是振動信號。此一現象——地線迴路雜訊，最常被發現在工廠內或工業界的現場環境內，由於待測物（機器）表面與地表接地不良，兩者可能並未擁有相同的電位差，因此當加速度計安裝於機器表面，再經由信號線連接至儀器、再至地表，結果形成一迴路，因而在信號線內產生電流，亦即是產生地線迴路雜訊。在實際的狀況中，可能遇見的此一現象就是在結構體尚未有振動信號產生時，量測儀器卻已經顯示信號過載（Over Load）的紅燈了。更甚者，操作者可能因手握加速度計或正在安裝加速度計時，將遭受類似電擊的傷害。尤其是對轉動機械或發電設備，當其表面聚集有大量電荷時，極易產生地線迴路雜訊或傷人的電擊。欲除去此一地線迴路雜

訊，可使用以下的方式：

- (1)使儀器有良好接地，且只有一點接地。
- (2)使用底部為絕緣材料的加速度計，如圖十九(a)。
- (3)使用雲母片與絕緣螺栓以切斷地線迴路。
- (4)使用的電荷放大器，可將輸入信號線的覆線與放大器的地線隔離[3]。
- (5)使用工業級的加速度計。此一類型加速度計其信號輸出線與加速度計外殼為絕緣狀態，其整條導線內包含兩條信號線且各有其覆網包覆，此一設計非但可除去地線迴路雜訊，且可減少電磁干擾。其示意圖，如圖十九(b)所示[4]。此一類型加速度計亦稱為Balanced Accelerometers[3]或Differential Accelerometers[5]，名稱雖不同但均指相同類型加速度計。使用此一類型加速度計時，另須配以Differential Charge Amplifier共同使用，以發揮其特有功能。



圖十九 避免地線迴路雜訊的方式



結 語

綜合以上討論，為使得加速度計達到最佳功能與獲得準確的量測，在選擇加速度計安裝方法時，須先做以下的考量 [1]

- (1) 加速度計的振動與所量測位置的結構振動應儘可能相同。
- (2) 結構振動因加速度計加入的影響應儘可能減小。
- (3) 加速度計的頻率範圍與動態範圍最好不要因安裝方式而有嚴重惡化現象。

為達到以上目的，在安裝加速度計時需注意：

- (1) 安裝表面應儘可能保持清潔與平坦。
- (2) 加速度計質量與安裝接合物質量應儘可

能輕。

- (3) 安裝接合物應儘可能有較大剛性，且安裝時需穩固。

- (4) 避免因安裝本身導致信號被扭曲，安裝接合物最好為對稱性。

在本文中介紹了信號線安裝、機械式濾波器安裝，地線迴路雜訊，以及以下六種加速度計安裝方法：

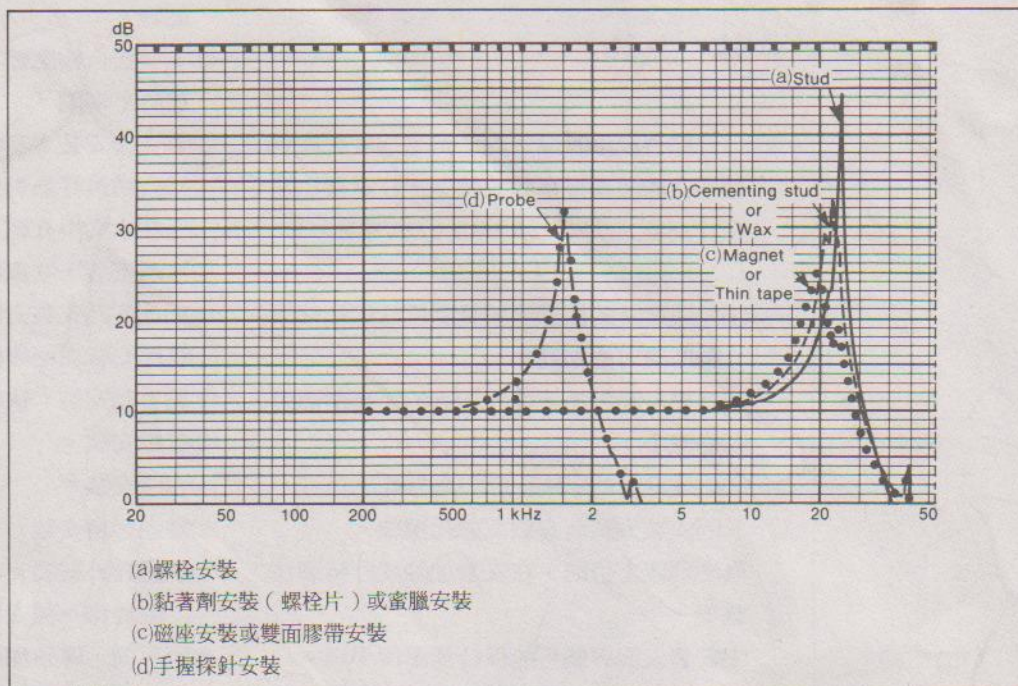
- (1) 螺栓安裝或絕緣螺栓配合雲母片安裝。
- (2) 黏著劑安裝（快乾膠液或Epoxy）。
- (3) 蜜蠟安裝。
- (4) 磁座安裝。
- (5) 雙面膠帶安裝。
- (6) 手握探針安裝。

由於每一種安裝方法其接合剛性強度有所不同，導致加速度計安裝後的共振頻率亦有高低，因而影響了加速度計的有效

表一 加速度計安裝方式及其特性比較

加速度計 安裝方式	使用最高 溫度(°C)	重複性	安裝時間	頻寬範圍 (共振頻率)	承 受 最大振幅	備 註
螺 栓	1000 250 (使用雲母片)	優	長	寬 (1.0)參考值	極高	• 若使用雲母片，厚度應儘量薄。
黏 著 劑	80	優 (使用螺栓片) 良	短(快乾膠) 長(Epoxy)	寬 (0.9)	高	• 使用特殊黏著劑最高溫度可達200°C [3]
蜜 蠟	40	良	短	寬 (0.9)	低 (100ms ⁻²)	• 蜜蠟厚度應儘可能薄，且均勻。
磁 鐵	150	良	極短	次寬 (0.8)	中 (2000ms ⁻²)	• 結構體需為鐵磁性材料 • 加速度計愈重，承受最大振幅愈小 • 適合先期探測
雙面膠帶	95	良	短	次寬 (0.8)	中	• 膠帶厚度應儘可能薄
探 針 式	—	劣	極短	極窄 (0.07)	—	• 非常不準確 • 適合低頻與先期探測

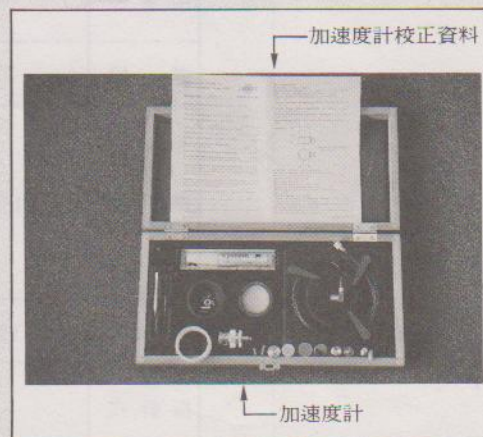
註：頻寬範圍因各加速度計不同，此處是取相對值，而以螺栓安裝的共振頻率(=1.0)為參考值。



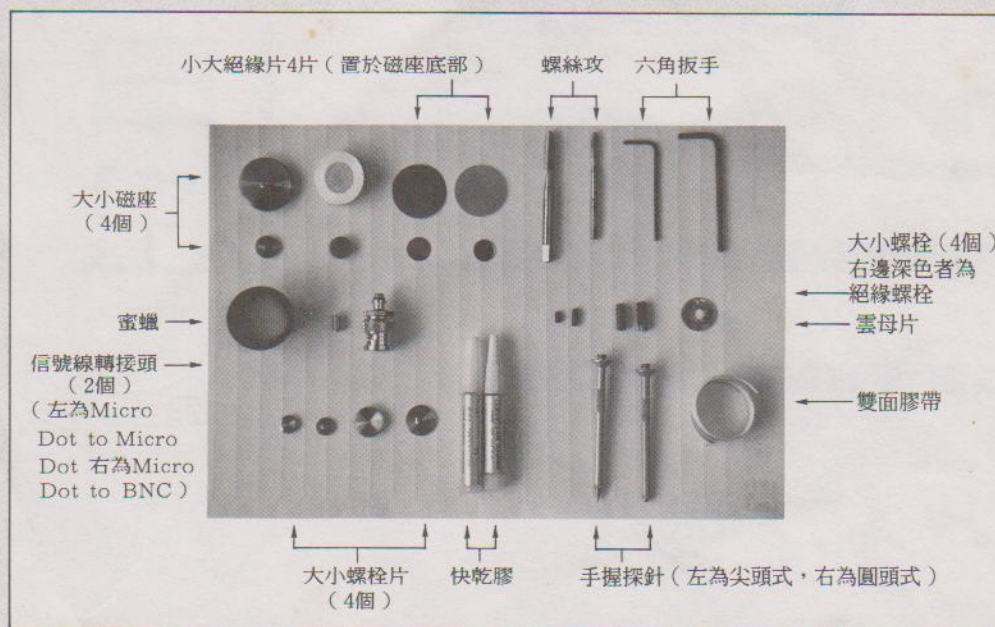
圖二十 不同安裝方式下的加速度計頻率響應位準 [3]

頻率範圍與動態範圍，其中以螺栓安裝頻率範圍最廣，手握探針安裝頻率範圍最差。為求得能正確量測結構體的加速度，在使用加速度計時，量測振動頻率基本上必須遠離加速度計的基礎共振頻率，亦即是第一個共振頻率。若需要量測振幅與實際振幅誤差小於5%時，量測頻率最好小於基礎共振頻率的20% [3]。若量測時需要較佳的重複性，鑽孔攻牙的螺栓安裝則是較佳的選擇。表一為綜合六種不同的加速度計安裝方式之特性比較 [3]，其中螺栓安裝與黏著劑安裝，它們的使用頻率範圍與最大振幅較不受限制，其餘安裝方法則各有其相關限制，使用時必須特別注意。圖二十為六種不同安裝方式下的加速度計頻譜圖，於圖中可看出加速度計可用的頻率範圍，以螺栓安裝為最廣，黏著劑

與蜜蠟安裝次之，磁鐵與雙面膠帶安裝又次之，手握探針安裝則屬最差。圖二十一為一加速度計組合，內含數種安裝加速度計的工具。圖二十二則為數種加速度計實際的安裝工具，以供參考。



圖二十一 加速度計組合 (Brüel & Kjær 公司)



圖二十二 數種加速度計安裝工具 (Brüel & Kjær公司)

參考文獻

1. ISO 5348, 1987, Mechanical Vibration and Shock-Mechanical Mounting of Accelerometers.
2. 陳興, 「如何選擇加速度計」, 機械工業雜誌, 第87期, 6月號, 1990, P221~P224。
3. Serridge, M. and Licht, T.R., "Piezoele-

ctric Accelerometers and Vibration Preamplifiers-Theory and Application Handbook," 1987, Brüel & Kjær Company, Denmark.

4. "Measuring Vibration", 1980, Brüel & Kjær Company, Denmark.
5. General Catalay, Endevco Company, California, U.S.A. ☼

