

# MEMS 加速計成爲研發業者在開發 CbM 的最佳選擇 (II)

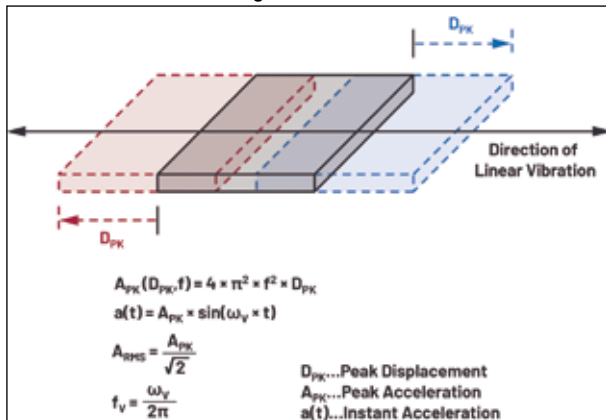
作者：Chris Murphy / ADI 應用工程師

## g 值範圍

這方面的資料反映出加速計的可接受範圍，感測器能可靠地偵測，同時保證達到資料表所列的效能。在測試 ± 2 g 感測器時，只要在手上搖晃感測器就能產生超過 2g 的加速度。大多數 MEMS 加速計，尤其是具有類比輸出端的元件，由於具有機械以及訊號調節的電子零件，因此都留有一些振動保護餘裕度 (headroom)。在 CbM 方面，小型資產 (ISO 10816-7 泵浦) 的典型 g 值範圍從 ± 16 g 起，但在工業齒輪箱、壓縮機、中高壓感應馬達等機具的零件其範圍可能高至 ± 500 g。

在量測振動時必須瞭解加速度、速度、以及位置之間的關係。如果在某個軸向上量測到的振動導致 250 nm 的位移，在 1 kHz 下的振動產生峰值加速度會是 APK (250 nm, 1 kHz) = 1 g。在 10 kHz 下出現相同的位移，則峰值加速度則會是 APK(250 nm, 10 kHz) = 100 g。

圖 3: 加速、速度、位置、g 值範圍之間的關係 5



在選擇振動感測器之前，必須先瞭解資產發生的各種潛在振動。一些馬達製造商會提供這方面的資訊。另外像 ISO 10816 這類標準也能提供此方面的協助，如「雜訊密度」章節所述。

在針對 ISO 10816 規範的機具挑選 MEMS 加速計時，我們可依賴一些簡單步驟，判斷 g 值範圍是否可被這類使用情境所接受。公式 4 列出一個例子，判斷 Class IV 資產量測到可接受振動嚴重性，根據 ISO 10816-1(VMAX= 28 mm/sec) 標準，在 1000 Hz (fMAX) 頻率下必須量測到振動嚴重性水準以及 g 值範圍，以偵測每種類型馬達的潛在故障。唯一具有足夠雜訊性能與 g 值範圍的感測器至少達到 ± 25.3 g<sup>4</sup>。

$$A_{PEAK} > 2 \times \pi \times f_v \times V_{PEAK}$$

$$A_{PEAK} > 2 \times \pi \times 1000 \text{ Hz} \times \frac{0.028 \text{ m}}{\text{sec}} \times \frac{1 \text{ g}}{9.8 \text{ m/sec}^2} \quad (4)$$

$$A_{PEAK} > 25.3 \text{ g}$$

這裡要注意的是，這些故障分類並沒有考量到 MEMS 感測器承受的正常負載振動。一般而言，具有較小 g 值範圍或全量程的感測器，比較不能承受機械元件的磨損。此外，在較小的全量程之下，量測標的振動更容易被基準線振動 (baseline vibrations) 所掩蓋。

表 8 列出 ISO 10816 振動嚴重度，包括每個種類資產的 mm/s 與 g 單位的數值。這裡比較一些適合用在 CbM 的 MEMS 加速計。± 16 g 的 g 值範圍不足夠用在 Class III 與 Class IV 資產，但可以被 Class I 與 Class II 資產接受。唯二兩款具有足夠 g

表 8: 比較 MEMS 加速計在搭配 Class I 至 Class IV 馬達使用時的 g 值範圍

	g 值範圍	峰值加速度 (g)			
		Class I 7.1 mm/s 6.4 g	Class II 11.2 mm/s 10.1 g	Class III 18 mm/s 16.3 g	Class IV 28 mm/s 25.3 g
ADXL1002	50 g	通過	通過	通過	通過
ADXL317	16 g	通過	通過	失敗	失敗
MEMS B	16 g	通過	通過	失敗	失敗
MEMS C1	16 g	通過	通過	失敗	失敗
MEMS C2	64 g	通過	通過	通過	通過

值範圍的感測器是 ADXL1002 與 MEMS C2。

根據 ISO 10816 標準，低 g 值範圍 MEMS 加速計在 CbM (< ± 16 g) 狀態監測方面受限於用在 Class I 與 Class II 機具，因為 Class III 與 Class IV 機具的最大振動嚴重度超過 ± 16g。表示在 CbM 方面，低 g 值範圍 MEMS 加速計的雜訊性能變得更加重要，此方面的性能確保其能用在 Class I 與 Class II 機具，如「雜訊密度」章節所述。

在針對用於 CbM 應用挑選 MEMS 加速計時，應該參考資產製造商的規格資料，找出潛在故障振動嚴重性資訊；執行自己的測試；以及 / 或參考像是 ISO 10816 這類的標準。結合表 7 與表 8 的資訊，明顯看出市場上大多數 CbM MEMS 加速計無法達成 ISO 10816 在雜訊性能方面的標準，藉以量測出正常狀態振動嚴重度與 g 值範圍，從而偵測到每種類型馬達的潛在故障。唯一具有足夠雜訊性能與 g 值範圍的感測器是 ADXL1002，此款 Analog Devices 旗下系列感測器成員專為 CbM 應用設計。很明顯可看出，CbM 應用的 MEMS 加速計目的技術尖端程度必須根據此方面的證據進行分類，如表 9 所示。雜訊與頻寬被視為是最重要的因素，因此會

表 9: 根據關鍵標準針對預測性維護挑選最佳 MEMS 加速計的決策矩陣

參數 [加權]	ADXL1002	ADXL317	其他 MEMS 廠商		
±3 dB 頻寬 [5]	1	5	3	4	2
雜訊密度 [4]	1	2	3	4	5
g 值範圍 [3]	2	3	3	3	1
溫度範圍 [2]	1	1	2	2	2
跨軸敏感度 [1]	1	1	3	2	2
加總	18	45	43	51	42
排名	第一	第四	第三	第五	第二

提高權重。其次是 g 值範圍，接著是溫度範圍以及跨軸敏感度。

在效能方面，ADXL1002 具有明顯卓越性，因此被分類為 CbM 應用效能最高的 MEMS 加速計。其他所有感測器雖然也提供很好的效能，但由於效能上的差距，因此被分別為中等效能的 CbM 加速計。

## 溫度

MEMS 加速計在溫度性能方面須考量許多規格。表 10 列出溫度相關資料表規格的比較。明顯看出數據的範圍很大，但在轉為效能之後有什麼意義？在 CbM 最常見的應用 (石油與天然氣、金屬加工、食品與飲料、以及發電) 資產因為各種因素導致溫度很容易超過攝氏 105 度，像是負載超載導致電流過高，污染物 (灰塵、碎屑) 導致馬達內部溫度升高而無法冷卻，甚至引發振動而產生額外的熱量。各種外部因素，像是潛在的氣體或蒸氣洩漏，在挑選感測器方面亦扮演一定的角色。壓電元件製造商將其通用型振動感測器的最高溫度範圍設定在攝氏 120 度，一些應用專屬感測器的最高工作溫度可達到攝氏 150 度。一項高頻感測器 (10kHz 以上) 的調查顯示 74% 的感測器其最高工作溫度範圍低於攝氏 125 度，有 24% 低於或等於攝氏 80 度。一些特定用途壓電感測器能承受攝氏 200 度以上的高溫，類似特定用途 MEMS 加速計能支援攝氏 175 度的高溫，但本文討論的焦點並不是針對特定應用專屬感測器。

靈敏度定義了每單位加速的輸出變化量。靈敏度隨溫度變化，定義了感測器的靈敏度如何隨溫度變化。壓電式加速計的比例因子誤差 (scale factor error) 在溫度變化下通常是 5%，不過有時也會高達

表 10: 比較 MEMS 加速計在 CbM 的溫度效能

	ADXL1002	ADXL317	其他 MEMS 廠商
溫度範圍	-40°C 至 +125°C	-40°C 至 +125°C	-40°C 至 +105°C
敏感度變化	±5%	±2.5%(x, y) ±4.5%(z)	±1% 至 ±4.35%
0 g 偏移誤差	±10%	±9%	±0.1% 至 ±1%

20%，導致明顯的偏移。這些誤差必須在生產時加以校正。MEMS 加速計由於在製造階段已調整性能與特性，因此其隨著溫度變化的比例因子或靈敏度誤差就相當優異，感測器不會隨著溫度變化出現漂移。舉一個例子，ADXL1002 暴露在攝氏 25 度到 85 度的變化，靈敏度 (40 mV/g) 會改變  $0.03\%/^{\circ}\text{C} \times 60 = 1.8\%$ ，表示在 60 度的溫差下靈敏度從 39.28 mV/g 變成 40.72 mV/g。這顯示 MEMS 加速計的靈敏度在溫度變化下表現得相當穩定。對於大多數應用，並不需要對靈敏度進行溫度補償。

零 g 值偏移是指在加速計在沒有施予加速度下的輸出。理想狀況下這項偏移應該是零，但由於 MEMS 感測器內部固有缺陷，我們會看到一項 dc 直流偏移。在大多數情況下，維護人員主要關切的是動態資料 (加速計的交流輸出)，像是偏離基準線或偏離正常運作的趨勢。基於這項原因，在使用 MEMS 加速計進行 CbM 時，零 g 偏移並不是主要關切重點。零 g 偏移很容易就從量測數據校正出來，而且大多數高效能數位感測器都會提供暫存器讓用戶輕易執行這項動作。當偵測目標是直流或傾斜時，隨溫度變化的零 g 偏移也可以校正出來。工作溫度範圍越小，這方面的工作也越容易。

## 軸數量

MEMS 加速計有單軸、雙軸、以及三軸版本。不同於壓電式加速計，單軸與三軸 MEMS 加速計的尺寸並沒有差異。較小的尺寸是 MEMS 超越壓電式元件的其中一項關鍵優勢，另外還有大幅縮減的功耗以及更高的整合度。三軸壓電式加速計在包括成本等方面具有一些明顯的優點，相較於三軸 MEMS 加速計的尺寸與精度，最多會超出三個數量級。然而採用三軸壓電式加速計的其中一個主要驅動力是

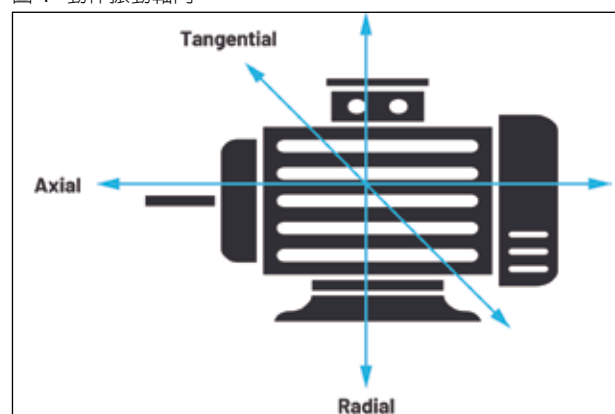
更容易讓可攜式振動讀取裝置收集數據。與其設置三個站點 (單軸感測器) 然後分別擷取三個數據，還不如用一個三軸感測器一次擷取數據。對於不易接觸拿取的資產，這會是一項極大的

優點。另外在量測多個方向的振動時，必須維持各軸之間的相位關係，而三軸元件能確保這方面的工作。在複雜振動分析方面，必須能觀測到所有軸向上的事件，而且沒有相位不匹配的狀況，因為不匹配可能導致對事件的錯誤判斷。

運用三軸壓電感測器量測 x、y、z 軸上的振動，就能量測到三個旋轉軸的切向動作 / 振動。由旋轉機具產生的許多機械力 — 像是軟性支撐結構 (soft footing) — 會導致外殼出現切向動作。這些數據無法運用單軸壓電感測器偵測出來。運用單軸 MEMS 加速計就有可能偵測到這類事件，因為如果資產產生的振動出現在敏感軸上，受測訊號的直流內容就會對應到傾斜度。

振動激發源 (excitation) 通常具有方向性，方向取決於故障，像是軸承外圈襯套脫落、機械鬆動、錯位、或齒輪損壞。故障振動的方向並非總是可以預測，因此無法知道振動會朝向哪個方向 — 軸向、徑向、或切向。另外也可能有多個故障導致異常振動。一項研究案例顯示運用三軸壓電感測器對比單軸徑向與軸向感測器能改進偵測的成效<sup>6</sup>。此項研究顯示若只設置在徑向或切向，單軸加速計會錯過前述近 50% 的機械故障，如圖 4 所示。問題徵結在於

圖 4: 動作振動軸向



觀察到故障振動的方向，因此在相同軸向上加裝更多感測器並不會解決這項問題。加裝一個軸向感測器，故障偵測率會提高到將近 70%。再多加裝一個軸向感測器，偵測率可提高到 80%。這反映出不同軸向上的額外診斷資訊能帶來更好的故障偵測成效，但若是採用三軸感測器就不必如此。這項研究發現，在許多案例中擷取所有三個軸向的資料是不必要的，但如果可行仍建議量測所有三個軸向的數據。

雖然獲得更多數據總是有益，但並非永遠是必要的，尤其是在無線系統上，量測與傳輸冗餘數據就會縮短電池壽命。不論是單軸、雙軸、或三軸，妥善地設置感測器都非常重要，但根據上述的研究，在有線式壓電感測器的基礎上，應該盡可能採用三軸感測器。

就 MEMS 加速計而言，相較於壓電式感測器，任何現有三軸感測器的效能都有所下降，因此可能無法偵測到同樣多的故障。此外，大多數三軸 MEMS 加速計的 z 軸向在雜訊、頻寬、或兩者方面的效能會比較低，如表 11 所示，這可能會削弱三軸壓電加速計在研究報告上顯示增加額外軸向獲得額外價值的潛力。在一些案例中，所有軸向在雜訊與 / 或頻寬方面會有不同的效能表現，而這同時也是 CbM 最重要的兩項規格。

在雜訊與 / 或頻寬效能上的此種不匹配，首先會顯現在某處資產上額外增加軸向 (y,z) 後有時被忽略掉的優勢。熟悉 MEMS 感測器的設計者都很瞭解這點，但必須考量幾件事。MEMS 三軸加速計的成本比起效能相近的壓電加速計要低上好幾個數量級，而且體積小上許多，因此即使針對重要性較低的資產安裝無線感測元件，也可以設置更多感測器。這樣做

表 11: 在 CbM 方面，MEMS 加速計在各軸向上雜訊與頻寬的變異

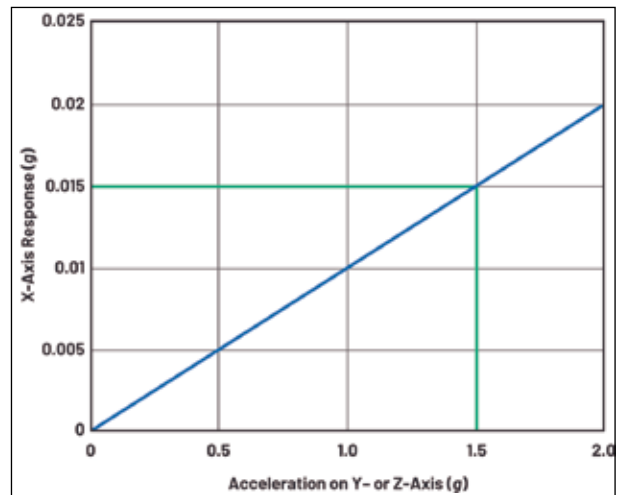
	ADXL1002	ADXL317	其他 MEMS 廠商
X 軸頻寬	11 kHz	4 kHz	4.2 kHz 至 8.2 kHz
Y 軸頻寬		4 kHz	4.2 kHz 至 8.5 kHz
Z 軸頻寬		2 kHz	2.9 kHz 至 6.3 kHz
X 軸雜訊	25 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	55 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	75 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 至 300 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Y 軸雜訊		55 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	75 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 至 300 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Z 軸雜訊		120 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	110 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 至 300 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$

可提供更多診斷資訊，掌握資產的整體運行狀況。

### 跨軸靈敏度

跨軸靈敏度 (CAS) 是指對不同軸向施加加速度時，在某個軸向看到的輸出量，通常以百分比表示。在壓電式加速計方面，通常是單軸元件，通常表現成橫向靈敏度，用來描述任何不是在量測軸向上出現的所有動作。對於僅在 y 軸向上偵測加速度的三軸加速計，由於 CAS 的緣故，因此也會在 x 與 z 軸向上量測到一些加速度。圖 5 顯示當 y(或 z) 軸向上經歷 1.5g 的加速度，而 CAS 為 1%；那麼在 x 軸上會觀測到的加速度為 15 mg 或 1.5 g 的 1%。如此現象也會影響到單軸 MEMS 加速計。這個百分比越低，量測與用來偵測故障、異常、漂移趨勢線的振動資料也就越精準與可靠。

圖 5: 一個在 y 或 z 軸向上加速的三軸加速計在 x 軸上觀測到的跨軸靈敏度



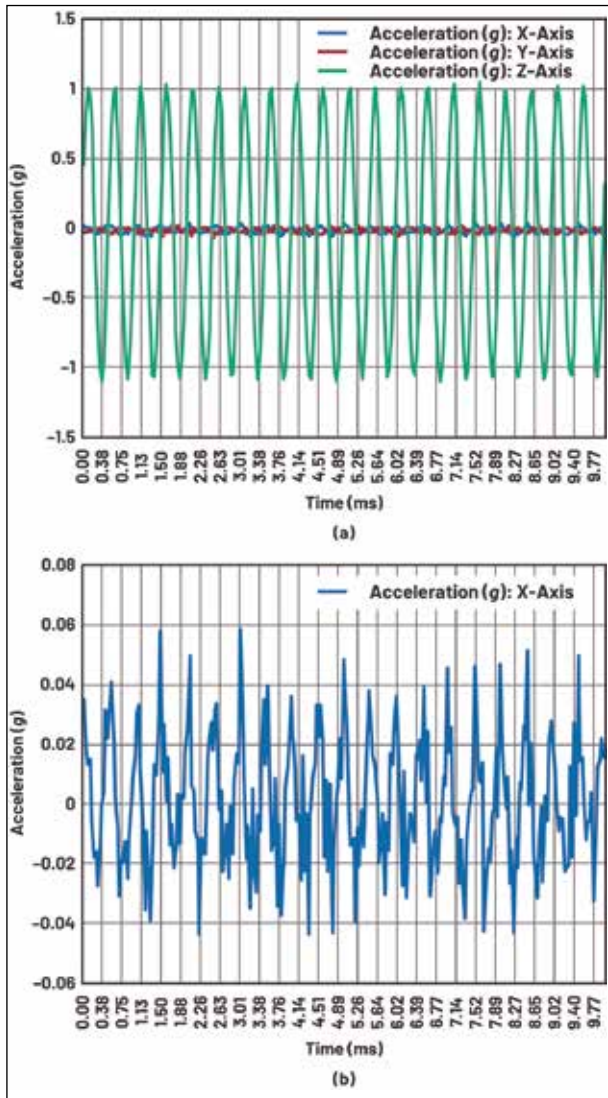
一些 MEMS 製造商在其資料表中沒有列出像 CAS 這些關鍵資訊，如表 12 所示，但對於 CbM 與 PdM 而言，這是一項極關鍵的規格，在嘗試早期偵測故障時，必須瞭解這項數據，其可能接近感測器的雜訊基底 (noise floor)。ADXL1002 列出的 1% 被認為是保守數據，實際測試的效能會略優於這項規格。

圖 6a 顯示在一個 MEMS 加速計上測的 CAS。振動僅施加在 z 軸向上。圖 6a 顯示 z

表 12: 在 CbM 中，MEMS 加速計的跨軸向靈敏度比較

	ADXL1002	ADXL317	其他 MEMS 廠商
跨軸向靈敏度	1%	1%	未列出，或最高至 2%

圖 6: (a) MEMS B 約 2.5% 的跨軸靈敏度，(b) 為放大後的 x 軸波型



軸上量測到約 1.1 g 的加速度，圖 6b 顯示在 x 軸測得約 0.05g 的峰值加速度，在 y 軸測得略小的 0.0425 g 加速度。

表 13 顯示 x 軸上最糟狀況 CAS 為 2.6%，以及 y 軸上的 2.2%。這可能是因為測試環境有錯位狀況，因此 CAS 可能至少有 2% 但低於 2.6%。雖然有可能校正 CAS，但最好是讓這個數值接近 1%，這在 MEMS CbM 加速計方面是領先業界的數據。壓電式元件 CAS 通常約在 5%，但在某些情況可能

表 13: MEMS B 感測器跨軸靈敏度

	峰值加速度 (g)	加速度 RMS (g)	CAS % (RMS)
Z 軸	1.1	0.76	
Y 軸	0.0425	0.017	2.2
X 軸	0.05	0.02	2.6

高達 15%<sup>7</sup>。一些壓電元件廠商可以依客戶要求提供低於 5% 的橫向靈敏度，但必須支付額外成本。

### MEMS 感測器裝至機具的解決方案

壓電式加速計是現今最常用的振動感測器。目前存在像是 IEPE 標準介面以及 4mA 至 20mA 的規格，以及包括螺柱、磁鐵、黏著等裝設方法。MEMS 加速計要和長久以來振動感測的黃金標準相互競爭，不光必須達到其效能水準，但要讓 MEMS 感測器能裝到資產上。過去這一直是 MEMS 加速器客戶面臨的一項痛點。任何振動量測環境中都存在多種共振，因此必須盡可能降低這些共振對量測造成的影響。超過 1 kHz 的頻寬，安裝就變得相當重要，因為共振有可能會嚴重影響量測結果。

在壓電式加速計方面，存在為數眾多的裝設策略，其中螺柱安裝提供最寬的頻率響應，一直延伸到掌上型探針頭，都有最低的頻率響應範圍。MEMS 加速計對磁鐵不敏感，而且能搭配磁鐵安裝策略使用。

為了能輕易把 MEMS 感測器裝到資產上，Analog Devices 開發出一種立方型基座，如圖 7 所示。中央的掛裝孔直徑為 0.2 吋，外圍護圈直徑為 0.38 吋，厚度為 0.3 吋，可以用 10 號螺絲將基座固定在資產上。多個系列加速器 (EVAL-ADXL100XZ、EVAL-ADXL35XZ、以及 EVAL-ADXL37XZ) 的轉接板都相容於這款基座。運用這個掛裝基座安穩地裝到受測機械源，就能在受



圖 7: 針對加速計轉接板進行最佳化的掛裝基座 (EVAL-XLMOUNT1)

控環境中評測加速計的頻率響應。

在擷取高頻率事件時，加速計的安裝保真度 (mounting fidelity) 相當重要。圖 8 顯示在振動台 (vibration shaker table) 驗證圖 9 所示的頻率響應。

感測器 PCB 電路板設計成低厚度 (3mm)，並在安裝到資產時，用特殊錫膏讓頻率響應能接近 MEMS 感測器資料表的數據。

圖 8: 振動量測測試機板透過鋁質基座安裝到振動台

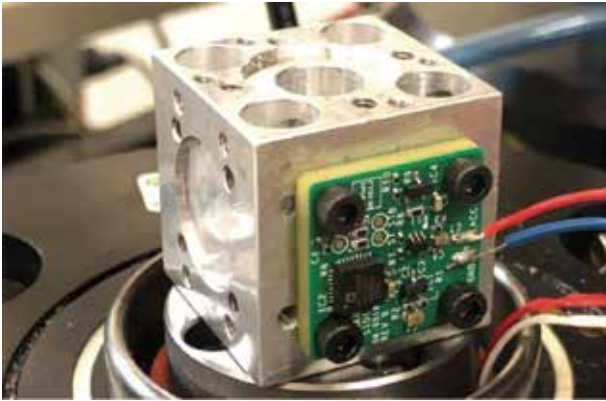


圖 9: 配備 IEPE 介面的 ADXL1002 其頻率響應

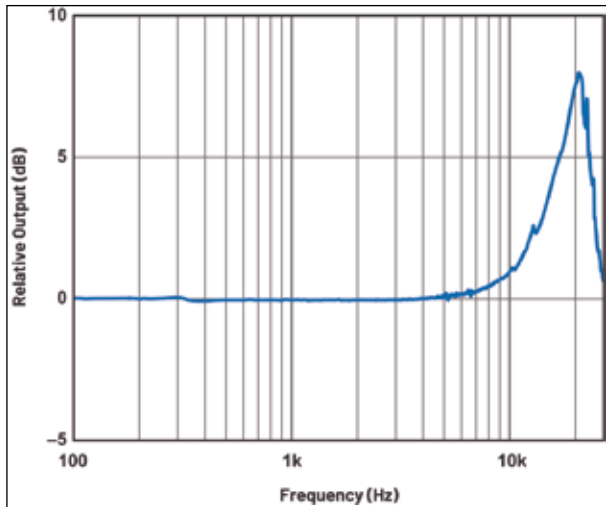


圖 8 顯示的參考設計電路板將 MEMS 加速計資料轉換成 IEPE 格式。其讓 MEMS 加速計從現有 IEPE 設定將資料輸出成 IEPE 格式，無縫且簡單地將 MEMS 加速計整合到新設或現有的 IEPE 基礎架構。

Analog Devices 長期致力將領先業界的感測器、訊號調節、以及處理元件整合成模組。最新 CbM 模組為 ADcmXL1021 與 ADcmXL3021，此兩款單軸與三軸 (1× 或 3× ADXL1002) 加速計 SPI 輸出解決方

案直接安裝到各種資產。其擁有超過 50 kHz 的機械外裝響應頻率，遠高於 10 kHz 的量測頻寬。

掛裝孔能使用 M2.5 號螺絲，將模組固定在基座上。扭力約 25 吋-磅的不銹鋼螺絲，其性能反映在 ADcmXL3021 產品手冊上的特性數據曲線。在一些情況需要永久固定時，除了掛裝螺絲外，還可選用如氰基丙烯酸酯之工業樹脂或黏劑來增強機械耦合。

圖 10: ADcmXL3021 寬頻寬、低雜訊三軸振動感測器



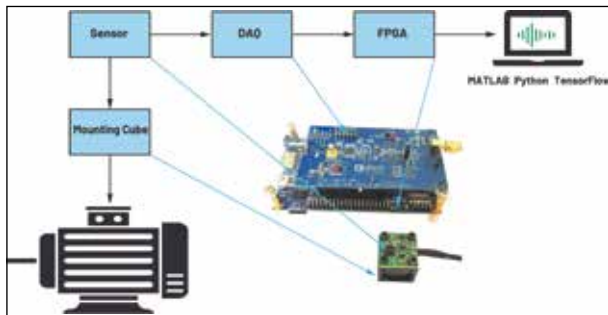
我們看到 ADXL100x MEMS 加速計除了擁有類似壓電式加速計的效能，還具備許多獨特優點，讓 CbM 與 PdM 能用在重要性較低的資產。在此同時，表 14 所示的 ADXL100x 系列 MEMS 加速計也被安裝在各種高度重要的資產，其以往都未曾採用 MEMS 加速計。Analog Devices 致力讓用戶輕易將 CbM 感測器安裝到各種資產 (XLMOUNT1, ADcmXL3021)。另外由於我們推出轉換參考設計方案 (MEMS 至 IEPE 或 4 mA 至 20 mA)，用戶也能輕易將壓電式感測器更換成 MEMS 元件。

ADI 的 CbM 參考設計方案、評估系統、開發平台、以及系統解決方案，目標都是讓客戶開發出最好的 CbM 與 PdM 系統，藉以維持資產與工廠正常運作。我們克服與解決 CbM 開發者面臨的大多數痛點，不光運用 MEMS 也採用壓電式加速計，未來也將繼續投資發展領先業界的 CbM 解決方案。下個章節將討論一個高保真度的高速資料擷取管線例子，讓 CbM 系統開發者能偵測重要的振動資料，並儲存到其機器學習開發環境 (Python、TensorFlow、MathWorks 等)。

表 14: ADXL100x 系列 CbM 加速計

零件編號	軸向數量	加速計量測範圍	雜訊密度 (典型值) g/ $\sqrt{\text{Hz}}$	BW(典型值) Hz	Is(typical) A	Vs+ (min) V	Vs+ (max) V
ADXL1001	1	100 g	0.00003	11,000	0.001	3.3	5.25
ADXL1002	1	50 g	0.000025	11,000	0.001	3.3	5.25
ADXL1003	1	200 g	0.000045	15,000	0.001	3	5.5
ADXL1004	1	500 g	0.000125	24,000	0.001	3.3	5.25
ADXL1005	1	100 g	0.000075	23,000	0.001	3	5.25

圖 11: CN-0549 模塊圖與影像



## CbM 開發平台

圖 11 所示的 CN-0549 CbM 開發平台匯集上述所有 MEMS 設計考量因素，針對 MEMS 加速計提供最高效能，可輕鬆裝至資產並維持資料表所列的效能。資料擷取板卡提供高速 24 位元解析度的訊號調節與資料擷取硬體解決方案，搭配 IEPE 壓電與 MEMS 加速計使用。另外還提供所有必要的韌體與評估軟體，開箱後立即可運行此系統。

CbM 開發平台的目標是讓 CbM 開發者收集大量高品質振動資料，藉以瞭解其資產運作的行為。在瞭解之後，就能藉由植入振動源 (seeded) 或模擬故障的方式來發展趨勢資訊，藉由機器學習演算法來找出與分析潛在故障。我們必須以最高保真度來擷取如此故障資料，然後傳至機器學習環境建構模型，藉以對資產的行為獲得更好的瞭解。

CbM 開發平台可以透過串流模式將高效能 IEPE 振動感測器資料傳至像是 TensorFlow 此類機器學習環境，而且即裝即用。許多 IEPE 壓電式感測器 (這些感測器不需要固定座就能裝在資產上) 或 ADXL1002 IEPE 解決方案 CN-0532 可搭配 CbM 開發平台使用。DAQ 擷取板卡 CN-0540 是另一個參考設計方案，其為 IEPE 感測器提供最高精準度的資

料擷取訊號鏈，將全頻寬資料管線提供給 FPGA，讓系統能監視機具的數據特徵 (data profile)。一個在 FPGA 上運行的示波器應用，只需要透過 HDMI 就能連至螢幕，呈現頻率頻譜資訊，讓使用者快速透過視覺影像掌握其機具的健康狀況，或透過乙太網路將資料串流傳送至雲端。支援 Python 與 MATLAB 讓開發者能直接將機器學習資料連至這些熱門工具。開發者之後可利用機器學習資料為其設備開發各種演算法以改進維護策略、預測故障、以及潛在的工廠停機狀況。

## 總結

本文討論在 CbM 系統中採用 MEMS 加速計要考量的最重要標準。我們得知少數 MEMS 加速計能提供取代壓電式加速計的可行方案；然而 MEMS 加速計之間存在明顯落差，也反映出需要對這些感測器加以分類。文中討論並與現有 ISO 10816 振動標準進行比較，進一步確認 MEMS 加速計在 CbM 的效能差異。

本文亦根據雜訊、頻寬、g 值範圍等最重要規格對 MEMS 加速計進行分類。由於 ADXL100x 系列感測器具備寬頻寬、超低雜訊、以及高 g 值範圍，使其成為能與壓電式加速計競爭的感測器，在針對各種 MEMS 競爭產品進行全面比較後，可確認是非常適合用於 CbM 與 PdM 應用的高效能 MEMS 感測器。在中等效能類別中，亦即所有其他 MEMS CbM 感測器所屬的類別，Analog Devices 提供眾多三軸數位感測器，如 ADXL317 便是雜訊極低的寬頻寬數位 MEMS 加速計，能及早偵測振動並協助資產甚至工廠順暢運行。 