

為應用選擇最合適 MEMS 加速度計 — 第二部分

■文：Chris Murphy / ADI 歐洲中央應用中心應用工程師

簡介

為應用選擇最合適的加速度計可能並不容易，因為來自不同製造商的產品資料手冊可能大相逕庭，讓人難以確定最為重要的技術指標是什麼。在本文中，我們將從穿戴式設備、狀態監測和物聯網應用的角度重點討論各項關鍵技術指標和特性。

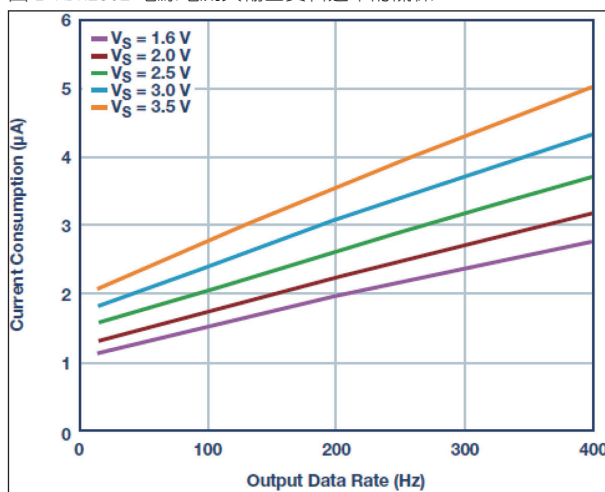
穿戴式裝置

關鍵指標：低功耗、小尺寸、旨在增強節能性能的整合特性以及可用性。

用於電池供電型穿戴式應用的加速度計，其關鍵指標是超低功耗（通常為 μA 級），以確保儘量延長電池壽命。其他關鍵指標是尺寸和整合的特性，例如備用 ADC 通道和深度 FIFO，其作用是增進終端應用的電源管理和功能性。由於這些原因，穿戴式應用中通常採用 MEMS 加速度計。表 1 所示為部分生命體徵監測 (VSM) 應用及其在具體應用中的對應設定。用於穿戴式應用的加速度計通常可以對運動分類；檢測自由落體；測量運動是否存在以確定是使系統上電、關斷還是休眠；輔助實現資料融合，供 ECG 和其他 VSM 測量使用。同樣的加速度計也用在無線感測器網路和物聯網應用中，因為它們具有超低功耗的特性。

在為超低功耗應用選擇加速度計時，必須在產品資料手冊中標稱的功耗水準下觀察感測器的功能。要觀察的一項關鍵指標是頻寬和採樣速率是否會降至無法測量可用加速度數據的水準。有些競爭產品透過每秒關斷並喚醒的方式達到維持低功耗的

圖 1: ADXL362 電源電流與輸出資料速率的關係。



目的，但這樣做會錯過關鍵的加速度數據，因為有效採樣速率下降了。為了測量即時人體運動的範圍，需要大幅提高功耗。ADXL362 和 ADXL363 不會透過欠採樣混疊輸入訊號；它們採用全數據速率對感測器的整個頻寬進行採樣。功耗隨採樣速率動態變化，如圖 1 所示。需要注意的是，這些元件可在功耗僅為 $3\text{ }\mu\text{A}$ 的狀態下，以最高 400 Hz 的速率進行採樣。在穿戴式裝置中，這些較高的資料速率可實現額外的功能，如按一下 / 按兩下檢測。採樣速率可降至 6 Hz ，以便在被拾起時或者檢測到運動時裝置能啟動，此時的平均功耗為 270 nA 。這也使 ADXL362 和 ADXL363 非常適合植入式應用，因為在這種應用中電池更換非常困難。

在部分應用中，加速度計每秒只需輪詢一次、或幾次加速度即可。對於此類應用，ADXL362 和 ADXL363 提供了一種喚醒模式，功耗僅為 270

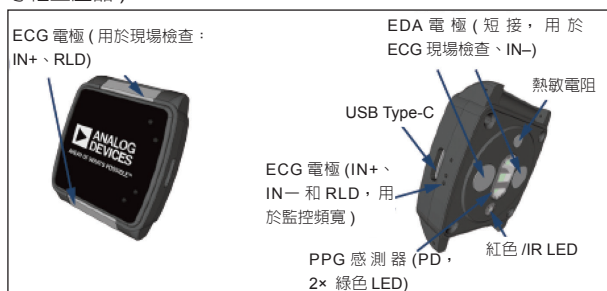
表 1: VSM 穿戴式應用的運動檢測要求

	計步器	跌落 (SW)	光學心率	按一下	休睡	運動開關	ECG	ADXL362/ADXL363
g 設定	2 g	8 g	4 g 或 8 g	8 g	2 g	2 g	4 g 至 8 g	2 g 至 8 g
ODR (Hz)	100	400	<50	400	12.5	6	<100	400
功耗	1.8 μ A	3 μ A		3 μ A	1.5 μ A	0.3 μ A		10 nA 至 3 μ A
FIFO (樣本集或時間)	150	越深越好	1 秒	越深越好	20	否	1 秒	512 秒或 13 秒
ADC	否	否	是	否	否	否	是	否 / 是
雜訊 (mg/ $\sqrt{\text{Hz}}$)	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	175 μ g 至 500 μ g
資料收集	24/7	24/7	隨機	24/7	檢測到運動時		練習過程中連續	全部
必要特性	RSS、8 位元	觸發模式 FIFO		觸發模式 FIFO	低雜訊	MCU 關		全部 (RSS 除外)

nA。ADXL363 整合了一個三軸 MEMS 加速度計、一個溫度感測器 (典型比例因數為 0.065°C) 和一個板載 ADC 輸入 (用於同步轉換外部訊號)，採用小尺寸、薄型 (3 mm x 3.25 mm x 1.06 mm) 封裝。加速度和溫度資料可存儲在 512 樣本多模 FIFO 緩衝器中，允許保存的資料時長高達 13 秒。

ADI 開發了一款僅供展示使用的 VSM 手錶 (如圖 2 所示)，旨在展示 ADXL362 等超低功耗元件在電池供電和空間受限應用中的潛力。

圖 2: VSM 手錶 (整合多款 ADI 元件，旨在凸顯超低功耗、小尺寸輕型產品)。



ADXL362 用於追蹤運動和記錄運動，說明從其他測量結果中消除干擾偽像。

狀態監測 (CBM)

關鍵指標：低雜訊、寬頻寬、訊號處理、g 範圍和低功耗。

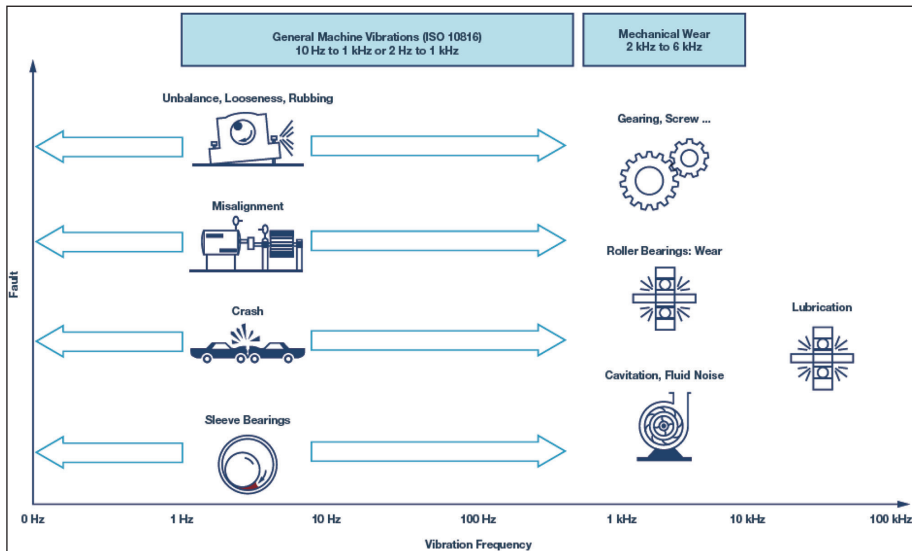
CBM 需要監控多項參數，比如機器振動，其

目的是發現和指示可能發生的故障。CBM 是預防性維護的一個重要組成部分，其技術通常用於驅動渦輪機、風扇、泵、電機等機械。CBM 加速度計的關鍵指標是低雜訊和寬頻寬。在撰寫本文之時，提供 3.3 kHz 以上頻寬的 MEMS 加速度計的競爭公司非常少，有些專業製造商提供的最高頻寬為 7 kHz。

隨著工業物聯網的發展，業界越來越重視減少佈線和利用無線、超低功耗技術。這使得 MEMS 加速度計在尺寸、重量、功耗等方面領先於壓電加速度計，並且有可能實現整合智慧特性。CBM 中最常用的感測器是壓電加速度計，因為這類感測器具有良好的線性度、SNR、高溫工作性能和寬頻寬 (典型範圍為 3 Hz 至 30 kHz，有些情況下可能高達數百 kHz)。然而，壓電加速度計在 DC 範圍下的性能欠佳 (如圖 3 所示)，因此在較低頻率至 DC 範圍內可能會出現大量故障，尤其是在風力渦輪機和類似的低 RPM 應用中。壓電感測器的機械性質使其難以像 MEMS 一樣實現大量生產，並且成本更高，在介面和電源方面的靈活性也比較低。

MEMS 電容式加速度計具有更高的整合度，功能也更為豐富，支援自檢、峰值加速、頻譜報警、FFT 和資料儲存，抗衝擊性能高達 10000 g，具有直流回應能力，並且尺寸更小、重量更輕。ADXL354/ ADXL355 和 ADXL356/ADXL357 具有超低的雜訊和出色的溫度穩定性，非常適合狀態監測

圖 3：轉動設備故障振動偽像。

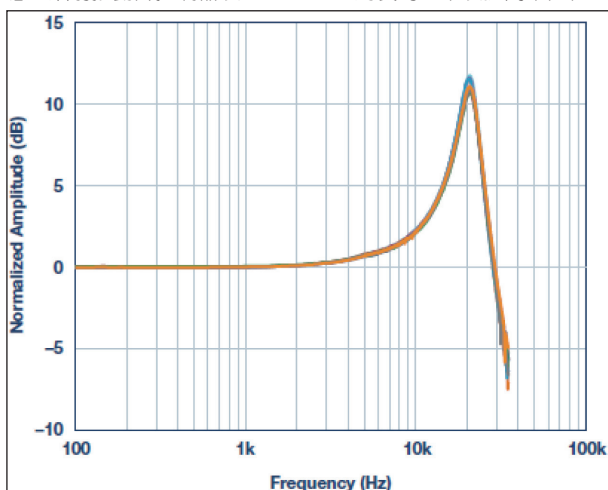


應用，但其頻寬限制使其無法進行更加深入的診斷分析。然而，即便頻寬範圍有限，這些加速度計也能提供重要的測量值；例如，在設備轉速超低的風力渦輪機狀態監測中。這種情況下，需要低至直流的回應。

ADXL100x 系列單軸加速度計針對工業狀態監測應用而優化，測量頻寬高達 50 kHz，g 值範圍高達 ± 100 g，並且擁有超低的雜訊性能——因而在性能方面可與壓電加速度計不相上下。

有關 ADI MEMS 電容式加速度計與壓電加速度計的詳細討論，請參閱以下文章：MEMS 加速度計

圖 4：ADXL1001/ADXL1002 的頻率回應、高頻 (>5 kHz) 振動回應；鐳射振動計控制器以 ADXL1002 封裝為基準以提高準確性。



性能已臻成熟。

ADXL1001/ADXL1002 的頻率回應如圖 4 所示。旋轉機械中發生的主要故障（如套筒軸承損壞、對準誤差、不平衡、摩擦、鬆動、傳動裝置故障、軸承磨損和空化）都在 ADXL100x 系列狀態監測加速度計的測量範圍以內。

壓電加速度計通常不整合智慧特性，而 MEMS 電容式加速度計（如 ADXL100x 系列）則整合了超量程檢測電路，當發生超過指定 g 值範圍

約 2 倍的嚴重超量程事件時，該電路可報警。在智慧測量和監控系統的開發中，這項功能非常關鍵。

ADXL100x 運用某種內部時脈智慧禁用機制來在持續發生超量程事件時保護感測器元件，比如，電機發生故障時就會出現情況。這種方式可以減輕主機處理器的負擔，並能增加一個感測器節點的智慧化程度——這兩項都是狀態監測和工業物聯網解決方案的關鍵指標。

MEMS 電容式加速度計在性能上已經取得巨大飛躍，因此，新的 ADXL100x 系列已經開始強力競爭並奪得以前由壓電感測器主導的陣地。ADXL35x 系列具有行業最佳的超低雜訊性能，還能取代 CBM 應用中的感測器。新型 CBM 解決方案和模式已經開始與物聯網架構相融合，形成更好的檢測、連接及儲存與分析系統。ADI 的最新加速度計將為邊緣節點帶來更加智慧的監控，幫助工廠管理方實現完全整合的振動監控和分析系統。

對這些 MEMS 加速度計形成進一步補充的是第一代 CBM 子系統，即 ADIS16227 及 ADIS16228 半自主型全整合式寬頻寬振動分析系統（如圖 5 所示）；這兩款產品具有眾多特性，比如六頻段可程式設計報警、2 級報警和故障定義設置、旨在減少誤報的可調回應延遲、帶狀態標誌的內部自檢等。頻域處理包括針對各軸的 512 點、實數值 FFT 和 FFT

均值功能，後一功能可降低本底雜訊變化，從而提高解析度。ADIS16227 和 ADIS16228 全整合式振動分析系統可以縮短設計階段，降低成本，降低處理器要求，減少空間限制，使其成為 CBM 應用的理想選擇。

物聯網 / 無線感測器網路

關鍵指標：功耗、支援智慧節能和測量的整合特性、小尺寸、深度 FIFO 和合適的頻寬。

整個業界對物聯網的前景都心知肚明。為了實現這種前景，將來幾年需要部署數百萬計的感測器。絕大多數這些感測器都會被安裝在操作不便或空間受限的位置（如屋頂、街燈頂部、塔桅、橋樑、重型機械內等），以實現智慧城市、智慧農業、智慧樓宇等概念。由於存在諸如此類限制，很可能一大部分這些感測器需要採用無線通訊和電池供電方式，也可能需要某種形式的能量採集方式。

物聯網應用的趨勢是盡量減少以無線方式傳輸至雲端或本機伺服器進行儲存和分析的資料，因為現有方法需要很高的頻寬並且成本較高。透過在感測器節點進行智慧處理，可以將無用資料與有用資料區分開，減少傳輸大量資料的必要性，從而降低頻寬和成本要求。這就要求感測器具備智慧特性，同時還要維持超低的功耗水準。標準物聯網訊號鏈如圖 6 所示。在閘道以外，ADI 可為各個模組提供解決方案。請注意，並非所有解決方案都需要無線連接，對於眾多應用來說，有線解決方案仍有必要，無論是 RS-485 介面，4 mA 至 20 mA，還是工業乙太網路等。

使節點具備一定的智慧之後，就可以透過訊號鏈只傳輸有用的資料——節省電能和頻寬。在 CBM 中，在感測器節點局部完成的處理量取決於多個因素，如機器的成本和複雜性與狀態監測系統的成本。傳輸的資料從簡單的超範圍報警到資料流程不盡相同。ISO 10816 等標準規定了相應的報警條件，當

圖 5：數位三軸振動感測器，整合 FFT 分析和儲存系統。

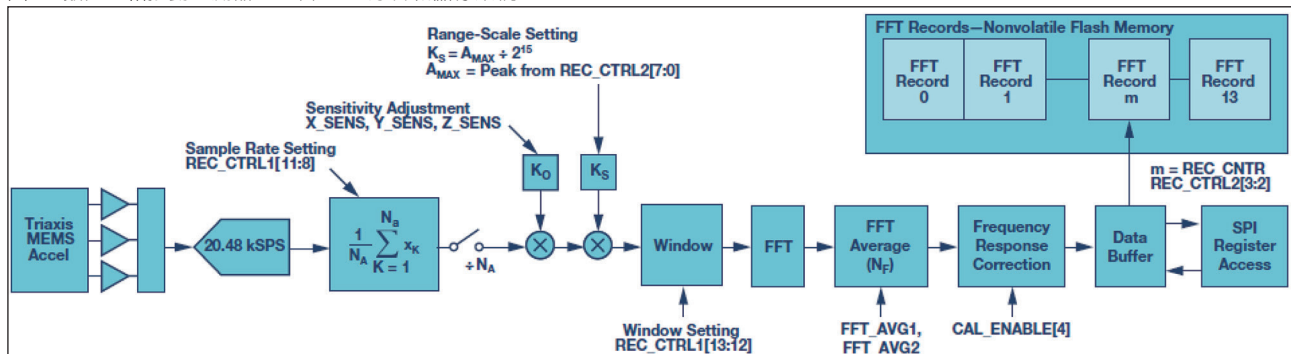
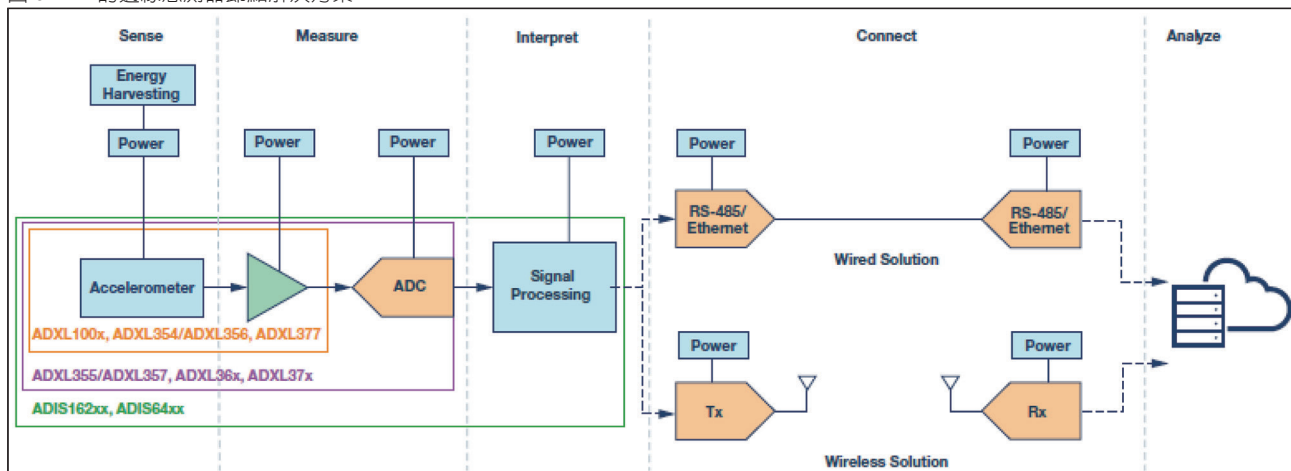


圖 6：ADI 的邊緣感測器節點解決方案。



給定尺寸的機器以特定 RPM 轉速運行時，如果振動速度超過預設門檻，機器就會輸出報警訊號。ISO 10816 的目的是優化被測系統及其滾動軸承的有效壽命，因此需要減少傳輸的資料量，從而為在 WSN 架構中的部署提供更好的支援。

對於用在 ISO 10816 應用中的加速度計，要求其 g 值範圍為 50 g 或以下並在低頻下保持低雜訊，因為系統會週期性地將加速度數據整合起來，以形成以 mm/sec rms 為單位的單一速度點。當整合含有低頻雜訊的加速度計數據時，速度輸出中的誤差可能會線性增大。ISO 標準規定的測量範圍為 1 Hz 至 1 kHz，但用戶都希望整合低至 0.1 Hz 的資料。傳統上，在電荷耦合壓電加速度計中，這受到了低頻高雜訊水準的限制，但 ADI 下一代加速度計能使本底雜訊最低保持在直流水準，只受訊號調理電子元件 1/f 的雜訊轉折頻率的限制，透過細心的設計可使該值降至 0.01 Hz。MEMS 加速度計既可以用在面向低成本設備的經濟型 CBM 應用中，也可以整合到嵌入式解決方案之中，因為相較於壓電感測器，它們的尺寸更小、成本更低。

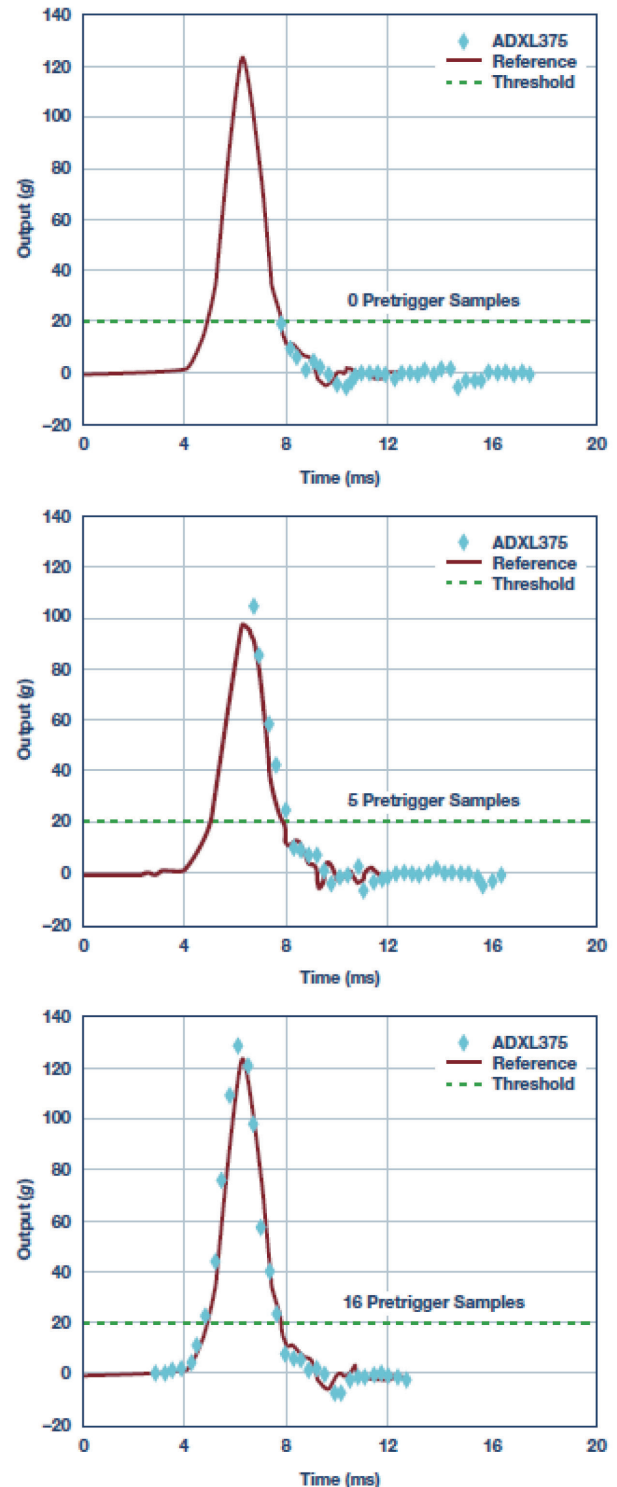
ADI 廣泛的加速度計產品是要求超低功耗的智慧感測器節點的理想選擇，其中整合多種特性，有助於延長電池壽命、減少頻寬用量並因此降低成本。物聯網感測器節點的部分關鍵指標有低功耗 (ADXL362、ADXL363) 和豐富的特性集合，以實現能量管理和特定資料檢測，如過門檻活動、譜線輪廓報警、峰值加速值和超長活動或非活動 (ADXL372、ADXL375)。

在把加速資料儲存在 FIFO 中並檢查是否存在活動事件時，所有這些加速度計都能使整個系統處於關斷狀態。發生衝擊事件時，事件發生前收集的資料被凍結在 FIFO 中。如果沒有 FIFO，如果要在事件發生之前捕捉樣本，就要求處理器連續採樣並處理加速訊號，結果會大幅縮短電池壽命。ADXL362 和 ADXL363 FIFO 可以儲存超過 13 秒的資料，因而能清楚展示活動觸發之前發生的事件。不使用功率工作週期，而是在所有資料速率下均採用全頻寬架構，由此防止輸入訊號混疊，從而維持超低功耗。

資產狀況監控

關鍵指標：功耗、支援智慧節能和測量的整合特性、小尺寸、深度 FIFO 和合適的頻寬。

圖 7：準確捕獲衝擊特性。



資產狀況監控 (AHM) 一般指在一定時間內對高價值資產進行監控，無論是在靜止狀態或還是在運輸途中。這些資產可能是船運集裝箱裡的貨物、遠程管道、平民、戰士、高密度電池等，此類資產容易受到撞擊或衝擊事件的影響。對於可能影響資產功能性或安全性的此類事件，物聯網提供了一種理想的報告基礎設施。對於 AHM 中使用的感測器，關鍵指標是能測量與資產相關的高 g 衝擊及衝擊事件並同時保持超低功耗。當把這類感測器嵌入電池供電或可攜式應用中時，要考慮的其他關鍵感測器指標包括尺寸、過採樣和旨在精確處理高頻成分的抗混疊特性，還有各種智慧特性，以透過增加主機處理器休眠時間並允許用中斷驅動演算法檢測和捕獲衝擊特性延長電池壽命。

ADXL372 低功耗型 $\pm 200\text{ g}$ MEMS 加速度計可滿足新興資產狀況監測市場對智慧物聯網邊緣節點的需求。該元件含有專門針對資產狀況監測市場開發的多項獨有特性，可簡化系統設計，並在系統層次實現節能目的。高 g 事件（如衝擊或撞擊）通常與較寬頻率下的加速度成分密切相關。要準確捕獲這些事件，需要寬頻寬，因為在頻寬不足的條件下進行測量會顯著降低記錄事件的幅度，導致錯誤。在產品資料手冊中這是要特別注意的一項關鍵參數。有些元件達不到奈奎斯特採樣速率標準的要求。ADXL375 和 ADXL372 提供捕獲整個衝擊特性的選項，可用於進一步分析而無需主機處理器干預。使用衝擊中斷寄存器並結合加速度計的內部 FIFO，可實現該功能。如圖 7 所示，為了在觸發事件之前確定衝擊特性，有充足 FIFO 非常重要。如果 FIFO 不足，就無法記錄和維持衝擊事件以供進一步分析。

ADXL372 的工作頻寬可在超低功耗水準下達到 3200 Hz。陡峭的濾波器滾降也有利於有效抑制頻外成分，為此，ADXL372 整合了一個四極低通抗混疊濾波器。如果沒有抗混疊濾波，凡是頻率超過輸出資

料速率一半的輸入訊號都會混疊進目標測量頻寬，導致測量誤差。該四極低通濾波器提供用戶可選濾波器頻寬，因而可為用戶應用帶來極大的靈活性。

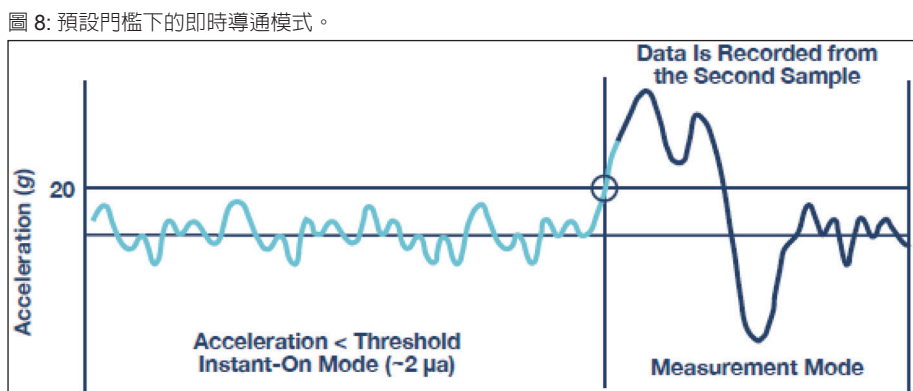
借助即時導通衝擊檢測特性，用戶可以對 ADXL372 進行配置，使其能在超低功耗模式下捕獲高於特定閾值的衝擊事件。如圖 8 所示，在發生衝擊事件之後，加速度計會進入全測量模式，以便準確地捕獲衝擊特性。

有些應用要求只記錄來自衝擊事件的峰值加速樣本，因為此類樣本本身就能提供充足的資訊。ADXL372 FIFO 可以為每個軸儲存峰值加速樣本。FIFO 中可以儲存的最長時長為 1.28 秒 (400 Hz ODR 條件下，512 個單軸樣本)。3200 Hz ODR 條件下的 170 個 3 軸樣本相當於一個 50 ms 的時間視窗，足以捕獲到典型的衝擊波形。對於不要求完整事件特性的應用，透過只儲存峰值加速資訊，可以大幅增加 FIFO 讀取操作之間的時間，從而實現進一步節能。512 個 FIFO 樣本可以透過多種方式分配，包括下列方式：

- 並行 3 軸資料的 170 個樣本集
- 並行 2 軸資料的 256 個樣本集 (使用者可選)
- 單軸資料的 512 個樣本集
- 170 個衝擊事件峰值集 (x, y, z)

適當使用 FIFO，使主機處理器能在加速度計自主收集資料時長時間保持休眠，可以降低系統級功耗。或者，使用 FIFO 收集資料可以減輕主機處理器的負荷，使它能處理其他任務。

市場上還有其他幾款具有類似高 g 性能的加速度計，但它們不適合 AHM/SHM 物聯網邊緣節點應



用，因為它們的頻寬較窄，功耗較高。在提供低功耗模式的情況下，無法進行準確測量的一般都是低頻寬。ADXL372 真正實現了即用即忘的 AHM/SHM 實施模式，促使最終客戶在可行的情況下重新考慮潛在資產類別。

結論

ADI 提供因應多種應用的廣泛加速度計產品，其中有些產品未在本文中重點討論，例如航位推算、AHRS、慣性測量、汽車穩定和安全、醫療對準等。我們的新一代 MEMS 電容式加速度計非常適合要求低雜訊、低功耗、高穩定性和溫度穩定性的應用；具有低補償的特性，並且整合眾多智慧特性，可提

升系統整體性能並降低設計複雜度。ADI 提供所有相關產品資料手冊資訊，旨在協助為您的應用選擇最合適的元件。以上列出的所有元件以及其他元件均可供評估和原型製作使用。

參考文獻

- Broeders, Jan-Hein. “從穿戴式裝置過渡到醫療設備”，ADI 公司，2017 年。
- Scannel, Bob. “嵌入式智慧和通訊可實現可靠且連續的振動監控”，ADI 公司，2015 年。
- Spence, Ed. “關於狀態監測的 MEMS 加速度計您需要知道哪些”，ADI 公司，2016 年。CTA

Gartner 預測

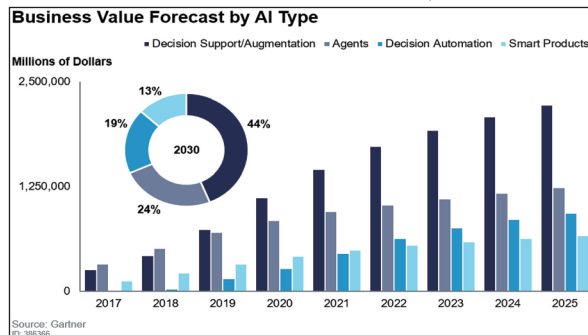
2021 年全球增強智慧商業價值將達 2.9 兆美元

國際研究暨顧問機構 Gartner 預測，2021 年全球增強智慧 (artificial intelligence augmentation) 將創造 2.9 兆美元的商業價值，並貢獻約 62 億小時的工作產能。Gartner 研究副總裁 Svetlana Sicular 表示：「增強智慧強調的是人們如何善用人工智慧獲益，但隨著人工智慧技術不斷演進，結合人類和人工智慧能力的增強智慧，將帶給企業最大效益。」

Gartner 的人工智慧商業價值預測報告顯示，企業認為所有人工智慧種類中，決策支援／擴增將帶來最高的商業價值，也是初期採用障礙最小的項目 (見表 1)。2030 年時，該項目會超越其他類的人工智慧專案，成為產出價值最高的類別，佔全球人工智慧商業價值 44%。

Gartner 研究指出，提升客戶體驗是人工智慧商業價值產出的主要來源。增強智慧不但能減少錯誤率，亦能大幅提升客戶便利性並提供更個人化的服務。許多過去僅為少數人提供的服務，現今都能在增強智慧的輔助下大眾化。Svetlana Sicular 指出：「增強智慧的目的是讓自動化更有效率，並

表 1: 全球各人工智慧種類的商業價值 (單位：百萬美元)



資料來源：Gartner (2019 年 8 月)

透過一點人情味和常理來管理自動化決策的風險。現在許多人對於人工智慧工具、服務和演算法抱著高度期待，卻忽略人工智慧的最終目的是讓人類更好、更聰明及更快樂，而非創造一個以機器為中心的世界。增強智慧是透過人工智慧邁向成功的方法，它讓機器和人類皆能達到最佳表現。」

Gartner 將增強智慧定義為人工智慧與人類為了增加認知表現 (cognitive performance)，展開以人為中心的合作模式，包括學習、決策和創造新體驗。