

為應用選擇最合適 MEMS 加速度計 — 第一部分

■文：Chris Murphy / ADI 歐洲中央應用中心應用工程師

簡介

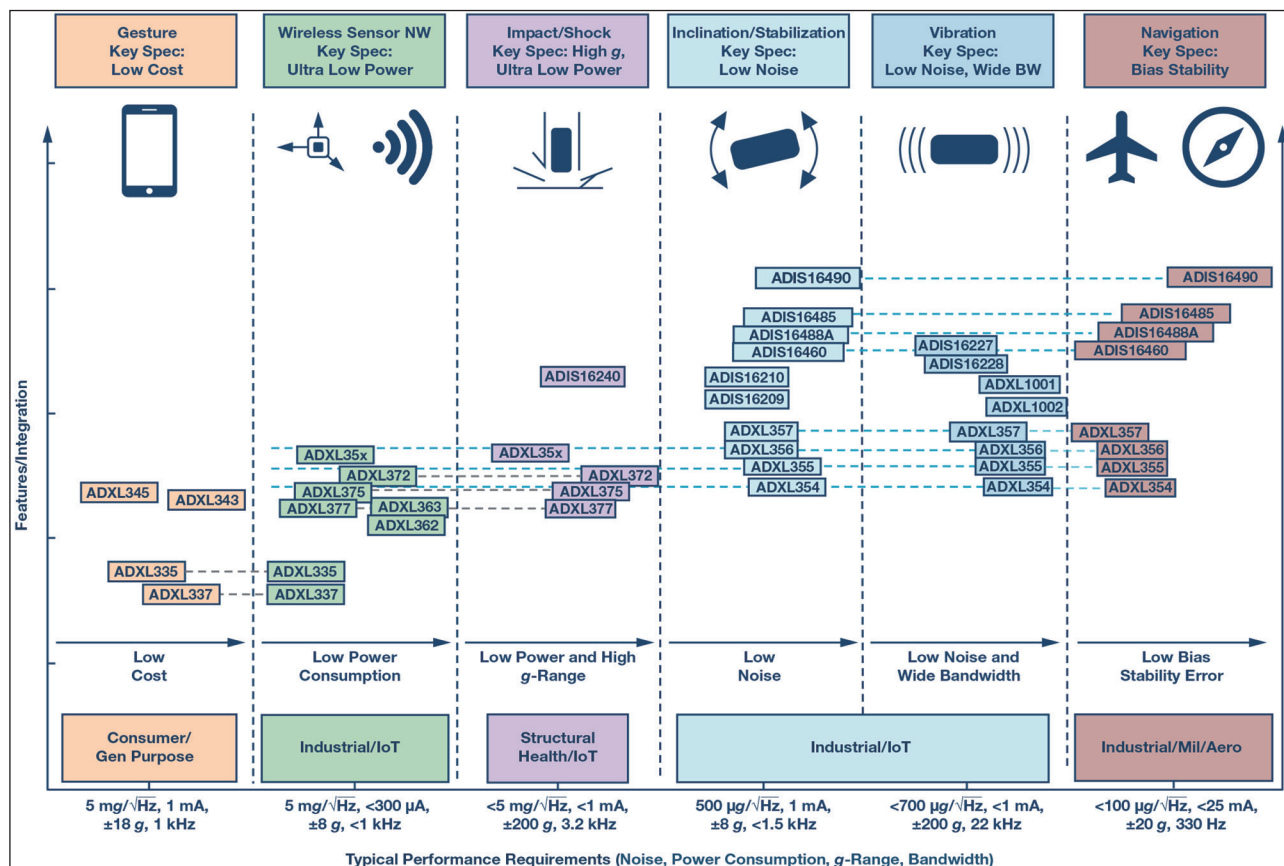
加速度計能夠測量加速度、傾斜、振動或衝擊，因此適用於從穿戴式健身裝置到工業平台穩定系統的廣泛應用。市場上，有成百上千的加速度計元件可供選擇，其成本和性能各不相同。本文第一部分討論設計人員需要知道的關鍵參數和特性，以及它們與傾斜和穩定應用的關係，以協助設計人員選擇最合適的

加速度計。第二部分將重點關注於穿戴式裝置、狀態監測 (CBM) 和物聯網應用。

表 1：加速度計等級和典型應用領域

加速度計等級	主要應用	帶寬	g 值範圍
消費級電子	運動、靜態加速度	0 Hz	1 g
汽車	碰撞 / 穩定性	100 Hz	<200 g/2 g
工業	平台穩定 / 傾斜	5 Hz 至 500 Hz	25 g
戰略	武器 / 飛行器導航	<1 kHz	8 g
導航	潛艇 / 飛行器導航	>300 Hz	15 g

圖 1：ADI 精選 MEMS 加速度計的應用版圖



最新 MEMS 電容式加速度計應用於傳統上由壓電加速度計和其他感測器主導的應用領域。新一代 MEMS 加速度計可為 CBM、結構健康監控 (SHM)、資產健康監控 (AHM)、生命體徵監測 (VSM) 和物聯網無線感測器網路等應用提供解決方案。然而，在有如此多加速度計和如此多應用的情況下，選擇合適的加速度計並非易事。

尚無業界標準界定加速度計屬於何種類別。加速度計的一般分類及相應的應用如表 1 所示。所示的頻寬和 g 值範圍是加速度計用在所列終端應用中的典型值。

圖 1 顯示了各種 MEMS 加速度計的快照，並依據特定應用的主要性能指標和智能 / 整合水平將各感測器歸類。本文的一個重要關注對象是基於增強型 MEMS 結構和訊號處理的新一代加速度計以及世界一流的封裝技術，其穩定性和雜訊性能可與更昂貴的專門元件相媲美，而功耗更低。這些特性及加速度計的其他關鍵規格，將在本文中依據應用相關性加以詳細討論。

傾斜檢測

主要標準：偏置穩定度、失調溫漂、低雜訊、可重複性、振動校正、跨軸靈敏度。

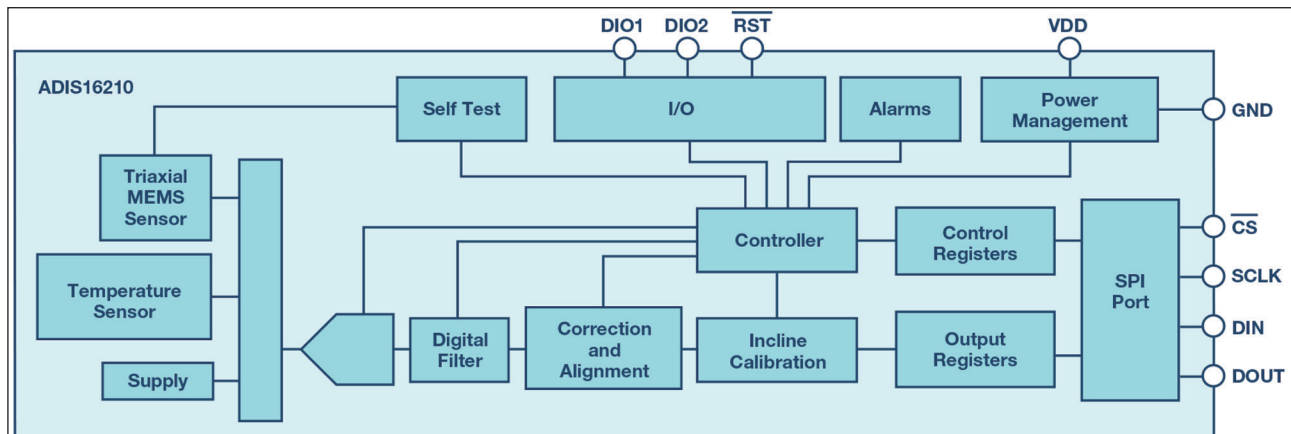
對 MEMS 電容式加速度計而言，精準的傾斜檢測是一種要求頗高的應用，尤其是在具有振動的情況下。在動態環境中利用 MEMS 電容式加速度計實現 0.1° 的傾斜精度非常困難—— $<1^\circ$ 很困難， $>1^\circ$ 則

較易實現。為使加速度計有效測量傾斜度，必須對感測器性能和終端應用環境有深入的了解。相較於動態環境，靜態環境對傾斜測量更加有利，因為振動或衝擊可能會破壞傾斜數據，引起嚴重測量誤差。傾斜測量的最重要特性有溫度係數失調、遲滯、低雜訊、短期 / 長期穩定性、可重複性和良好的振動校正。

0 g 偏置精度、焊接引起的 0 g 偏置漂移、PCB 外殼對準引起的 0 g 偏置漂移、0 g 偏置溫度係數、靈敏準確度和溫度係數、非線性度以及跨軸靈敏度等誤差是可以觀測到的，並且可以透過裝配後校準流程加以降低。遲滯、使用壽命期間的 0 g 偏置漂移、使用壽命期間的靈敏度漂移、潮濕引起的 0 g 漂移，以及溫度隨時間變化引起的 PCB 彎曲和扭轉等等，這些誤差項無法透過校準或其他方法解決，需要透過一定程度的原位維修才能減少。

ADI 的加速度計可分為 MEMS (ADXLxxx) 和 iSensor (ADIS16xxx) 特殊用途元件兩類。iSensor 或智能感測器是高整合度 (4 到 10 個自由度) 且可編程元件，適用於動態環境下的複雜應用。這些高整合度即插即用解決方案包括全面的工廠校準、嵌入式補償和訊號處理，解決了上述需要原位維修的很多誤差，大大降低了設計和驗證負擔。這種全面的工廠校準為整個感測器訊號鏈提供額定溫度範圍 (通常是 -4°C 至 $+85^\circ\text{C}$) 內的靈敏度和偏置特性。因此，每個 iSensor 元件都有其獨特的補償公式，安裝後可產生精準的測量結果。對於一些系統，工廠

圖 2: ADIS16210 精密三軸傾斜



校準可免除系統級校準，因此大幅簡化操作。

iSensor 元件專門針對某些應用而開發。例如，圖 2 所示的 ADIS16210 專門針對傾斜應用而設計並訂制，因此，它能提供 $<1^\circ$ 的相對精度且開箱即用。這主要歸功於整合訊號處理和特定元件校準，以便實現最佳精度性能。iSensor 元件將在穩定性部分進一步討論。

最新一代加速度計架構 (例如 ADXL355) 提供更多功能 (傾斜、狀態監測、結構健康、IMU/AHRS 應用)，包含的整合模塊更少針對特定應用，但功能豐富，如圖 3 所示。

下面比較通用加速度計 ADXL345 和新一代

低雜訊、低漂移、低功耗加速度計 ADXL355，後者是廣泛應用的理想之選，例如物聯網感測器節點和傾角計。這一比較著眼於傾斜應用中的誤差源，以及可以補償或消除的誤差。表 2 列出了消費級 ADXL345 加速度計理想性能規格及相應傾斜誤差的估算值。試圖達到最佳傾斜精度時，必須採用某種形式的溫度穩定或補償。在下面的例子中，假設恆溫為 25°C 。無法完全補償的最主要誤差促成因素是溫漂失調、偏置漂移和雜訊。可以降低頻寬來降低雜訊，因為傾斜應用通常需要低於 1 kHz 的帶寬。

表 3 列出了適用於 ADXL355 的相同標準。短期偏置值根據 ADXL355 產品手冊中的 Allan 方差

圖 3：低雜訊、低漂移、低功耗 3 軸 MEMS 加速度計 ADXL355

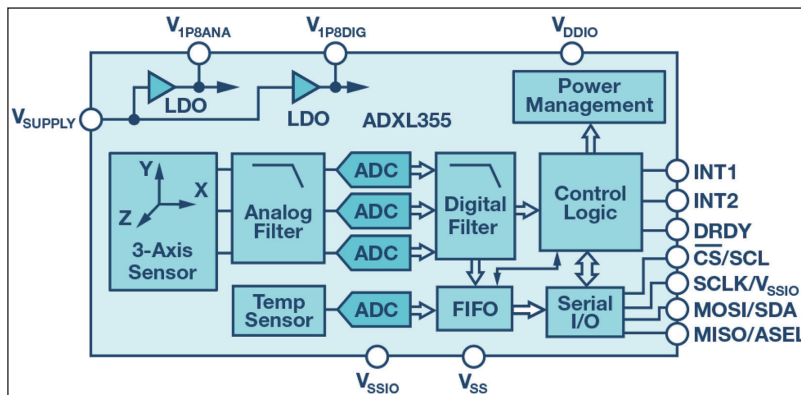


表 2：ADXL345 誤差源估算值

感測器參數	性能	條件 / 註釋	典型應用誤差	g 傾斜 $^\circ$
雜訊	X/Y 軸	頻寬為 6.25 Hz	0.9 m g	0.05 $^\circ$
偏置漂移	Allan 偏差	X/Y 軸短期	1 m g	0.057 $^\circ$
初始失調	35 m g	無補償	35 m g	2 $^\circ$
		有補償	0 m g	0 $^\circ$
誤差	無補償	6.25 Hz 頻寬	36.9 m g	2.1 $^\circ$
誤差	有補償	6.25 Hz 頻寬	1.9 m g	0.1 $^\circ$

表 3：ADXL355 誤差源估算值

感測器參數	性能	條件 / 註釋	典型應用誤差	g 傾斜 $^\circ$
雜訊	X/Y 軸	頻寬為 6.25 Hz	78 μ g	0.0045 $^\circ$
偏置漂移	Allan 偏差	X/Y 軸短	$<10 \mu$ g	0.00057 $^\circ$
初始失調	25 m g	無補償	25 m g	1.43 $^\circ$
		有補償	0 m g	0 $^\circ$
總誤差	無補償	6.25 Hz 頻寬	25 m g	1.43 $^\circ$
總誤差	又補償	6.25 Hz 頻寬	88 μ g	0.005 $^\circ$

圖估算。 25°C 時，通用 ADXL345 補償後的估計傾斜精度為 0.1° 。工業級 ADXL355 的估計傾斜精度為 0.005° 。透過比較 ADXL345 和 ADXL355 可以看出，重大誤差貢獻因素引起的誤差已顯著降低，比如雜訊引起的誤差從 0.05° 降低到 0.0045° ，偏置漂移引起的誤差從 0.057° 降低到 0.00057° 。這表明 MEMS 電容式加速度計在雜訊和偏置漂移等性能方面取得了巨大飛躍，在動態條件下能夠提供更高水平的傾斜精度。

選擇更高等級的加速度計對於實現所需性能至關重要，特別是應用需要小於 1° 的傾斜精度時。應用精度取決於應用條件 (溫度大幅波動，振動) 和感測器選擇 (消費級與工業級或戰略級)。在這種情況下，ADXL345 將需要大量的補償和校準工作才能實現小於 1° 的傾斜精度，增加整個系統的工作量和成本。根據最終環境和溫度範圍內的振動大小，甚至不可能實現上述精度。 25°C 至 85°C 範圍內的溫度係數失調漂移為 1.375° ，已經超過傾斜精度小於 1° 的要求。

$$0.4 \frac{\text{mg}}{^{\circ}\text{C}} \times \frac{1^{\circ}}{17.45 \text{ mg}} \times (85^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) = 1.375^{\circ}$$

25°C 到 85°C 範圍內 ADXL355 的最大溫度係數失調漂移為 0.5°。

$$0.15 \frac{\text{mg}}{^{\circ}\text{C}} \times \frac{1^{\circ}}{17.45 \text{ mg}} \times (85^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) = 0.5^{\circ}$$

ADXL354 和 ADXL355 可重複性 (X 和 Y 軸為 $\pm 3.5 \text{ mg}/0.20$, Z 軸為 $\pm 9 \text{ mg}/0.50$) 為 10 年壽命預測值, 包括高溫工作壽命測試 (HTOL) ($T_A = 1500^{\circ}\text{C}$ 、 $V_{\text{SUPPLY}} = 3.6 \text{ V}$ 、1000 小時)、溫度循環 (-55°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 且循環 1000 次)、速度隨機遊走、寬帶雜訊和溫度遲滯引起的偏移。這些新型加速度計可在所有條件下提供可重複的傾斜測量, 在惡劣環境中無需進行大量校準即可實現最小傾斜誤差, 而且能最大程度減少部署後的校準需要。ADXL354 和 ADXL355 加速度計能以 $0.15 \text{ mg}/^{\circ}\text{C}$ (最大值) 的零失調係數保證溫度穩定性。這種穩定性最大程度地減少了校準和測試相關的資源和成本開銷, 幫助設備 OEM 製造商實現更高的吞吐速率。此外, 產品採用密封封裝, 可以確保最終產品出廠後重複性與穩定性始終符合其規格參數。

通常, 產品手冊上不會顯示可重複性和對振動校正誤差 (VRE) 的抑制能力, 因為這些參數可能暴露產品性能較低。例如, ADXL345 是一款針對消費類應用的通用加速度計, VRE 不是設計人員的重要關注參數。然而, 在慣性導航等高要求應用、傾斜應用或振動頻繁的特定環境中, 對 VRE 的抑制能力可能是設計人員的重點關注對象, 因此 ADXL354/ADXL355 和 ADXL356/ADXL357 數據手冊會給出此類參數。

如表 4 所示, VRE 是加速度計暴露於頻帶振動時引入的失調誤差。當加速度計暴露於振動環境時, 相較溫漂和雜訊導致的 0 g 失調, VRE 在傾斜測量

表 4: 以傾斜度表示的誤差

元件	最大傾斜誤差	雜訊密度	振動校正
ADXL354	0.0085	0.0011	0.023 ¹
ADXL355	0.0085	0.0014	0.023 ¹

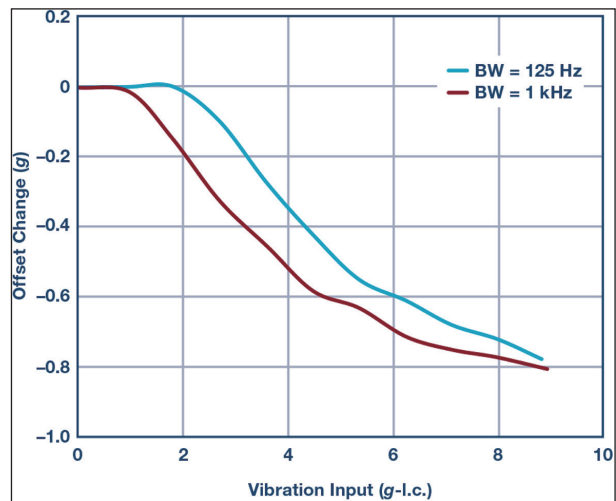
¹2.5 g rms 振動引起的 1 g 方位失調的範圍為 $\pm 2 \text{ g}$ 。

中會導致明顯誤差。這是不再使用產品手冊的主要原因之一, 因為很容易掩蓋其他主要規格。

VRE 是加速度計對交流振動 (被整流為直流) 的響應。這些直流整流的振動可能會使加速度計失調發生偏移, 引起嚴重誤差, 尤其是在目標訊號為直流輸出的傾斜應用中。直流失調的任何小變化都可能被解釋為傾角變化, 導致系統級誤差。

各種諧振和加速度計 (本例為 ADXL355) 中的濾波器均可能引起 VRE, 因為 VRE 對頻率有很強的依賴性。這些諧振會放大振動, 放大倍數等於諧振的 Q 因數, 而在較高頻率時會抑制振動, 原因是諧振器存在二階偶極子響應。感測器的諧振品質因數越高, 振動幅度越大, 其 VRE 也就越大。較大測量帶寬會將高頻帶內振動包含在內, 引起較高的 VRE, 如圖 4 所示。為加速度計選擇合適的帶寬以抑制高頻振動, 可以避免很多振動相關問題。¹

圖 4: 在不同頻寬進行的 ADXL355 VRE 測試



靜態傾斜測量通常需要 $\pm 1 \text{ g}$ 到 $\pm 2 \text{ g}$ 的低 g 加速度計, 頻寬小於 1.5 kHz 類比輸出 ADXL354 和數位輸出 ADXL355 均為低雜訊密度 (分別為 $20 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $25 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)、低 0 g 失調漂移、低功耗三軸加速度計, 整合溫度感測器, 測量範圍可選, 如表 5 所示。

ADXL354/ADXL355 和 ADXL356/ADXL357 採用密封封裝, 有助於實現卓越的長期穩定性。性能提升與封裝通常是正相關, 如圖 5 所示。封裝常常被忽

表 5：ADXL354/ADXL355/ADXL356/ADXL357 測量範圍

元件	測量範圍 (g)	帶寬 (kHz)
ADXL354B	$\pm 2, \pm 4$	1.5
ADXL354C	$\pm 2, \pm 8$	1.5
ADXL355B	$\pm 2, \pm 4, \pm 8$	1
ADXL356B	$\pm 10, \pm 20$	1.5
ADXL356C	$\pm 10, \pm 40$	1.5
ADXL357B	$\pm 10.24, \pm 20.48, \pm 40.96$	1

視，其實製造商可以利用封裝來實現更好的穩定和漂移性能。這是 ADI 公司的一個重點關注方面，我們提供類型廣泛的感測器封裝以適應不同的應用領域。

高溫 and 動態環境

在適合高溫或惡劣環境的加速度計可用之前，一些設計人員曾不得不將標準溫度 IC 用在遠超出產品手冊限值的情形中。這意味著最終用戶須承擔在高溫下檢驗元件質量的責任和風險，成本高昂且頗費時間。密封封裝能夠耐受高溫已是廣為人知的事實，它透過一道能抵禦濕氣和污染的屏障來防止腐蝕。ADI 公司提供各類密封元件，這些元

件具有增強的溫度穩定性和性能。ADI 公司還大力研究了塑料封裝在高溫下的性能，尤其是引線框架和引腳適應高溫焊接製程的能力，使其在高衝擊和振動環境中牢固可靠。因此，ADI 提供 18 款額定溫度範圍為 -40°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 的加速度計，包括 ADXL206, ADXL354/ADXL355/ADXL356/ADXL357, ADXL1001/ADXL1002, ADIS16227/ADIS16228 和 ADIS16209。大部分競爭對手未提供能在 -40°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 溫度範圍內或惡劣環境條件下（例如重工業機械和井下鑽探）工作的 MEMS 電容式加速度計。

在溫度超過 125°C 的惡劣環境中進行傾斜測量是極具挑戰性的工作。ADXL206 是一款高精度（傾斜精度 $<0.06^{\circ}$ ）、低功耗、完整的雙軸 MEMS 加速度計，適用於高溫和惡劣環境，例如井下鑽探。該元件採用 $13\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 側面釐焊、陶瓷、雙列直插式封裝，支持 -40°C 至 $+175^{\circ}\text{C}$ 的環境溫度範圍，超過 175°C 時性能會下降，但 100% 可恢復。

在有振動的動態環境中（例如農用設備或無人機）進行傾斜測量，需要 g 值範圍較高的加速度計，比如 ADXL356/ADXL357。有限 g 值範圍的加速度

計測量可能會削波，導致輸出失調增加。引起削波的原因可能是靈敏軸在 1 g 重力場中，或者是發生上升時間快但衰減慢的衝擊。較高的 g 值範圍可減少加速度計削波，從而降低失調，在動態應用中提供更好的傾斜精度。

圖 6 所示為 ADXL356 Z 軸的 g 值範圍有限的測

圖 5：高級封裝技術和校準帶來性能提升的示例

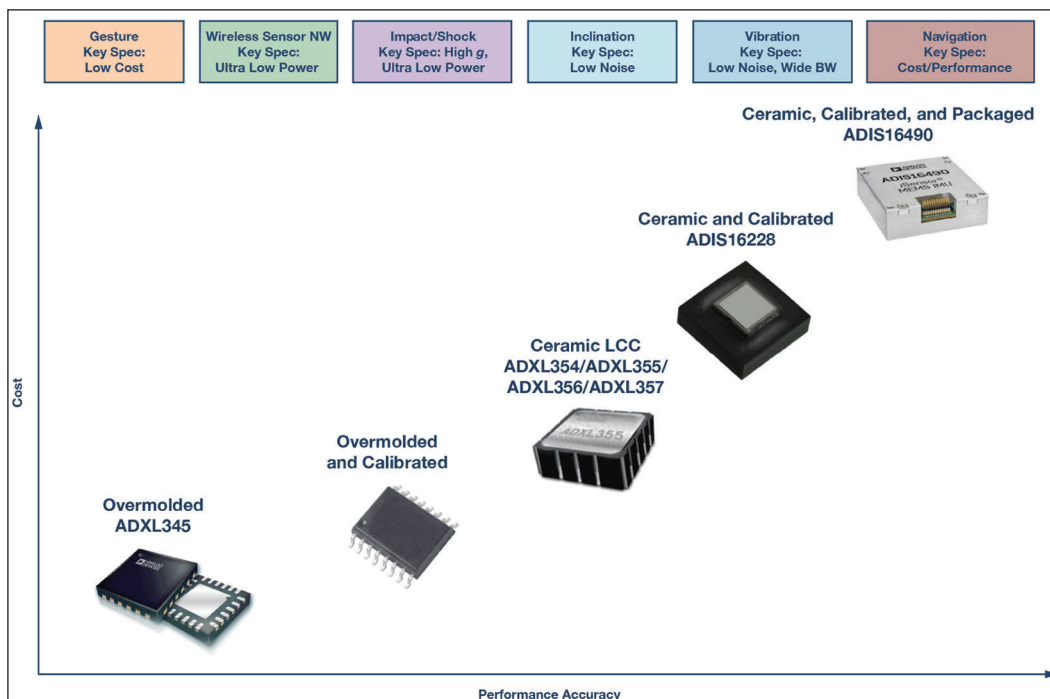
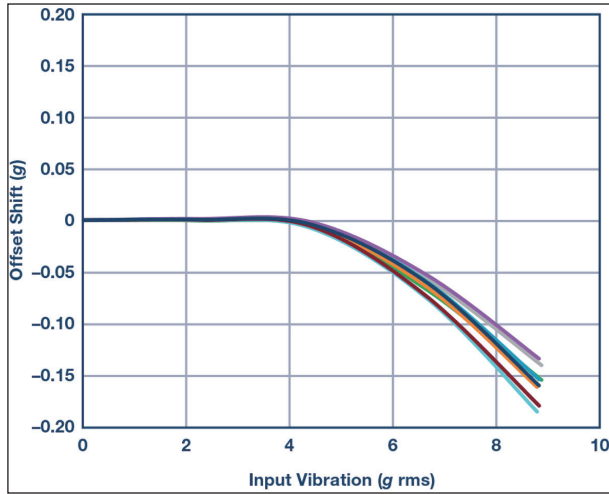


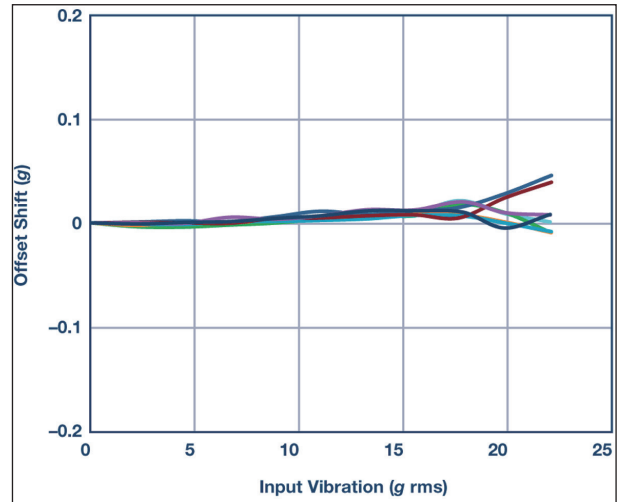
圖 6: ADXL356 VRE, Z 軸相對於 1 g 的失調, ± 10 g 範圍, Z 軸方向 = 1 g



量, 此測量範圍中已經存在 1 g。圖 7 所示為同一測量, 但 g 值範圍從 ± 10 g 擴展到 ± 40 g。可以清楚看到, 加速度計的 g 值範圍擴展顯著降低了削波引起的失調。

ADXL354/ADXL355 和 ADXL356/ADXL357 提供卓越的振動校正、長期重複性和低雜訊性能, 而且尺寸很小, 非常適合靜態和動態環境中的傾斜檢

圖 7: ADXL356 VRE, Z 軸相對於 1 g 的失調, ± 40 g 範圍, Z 軸方向 = 1 g



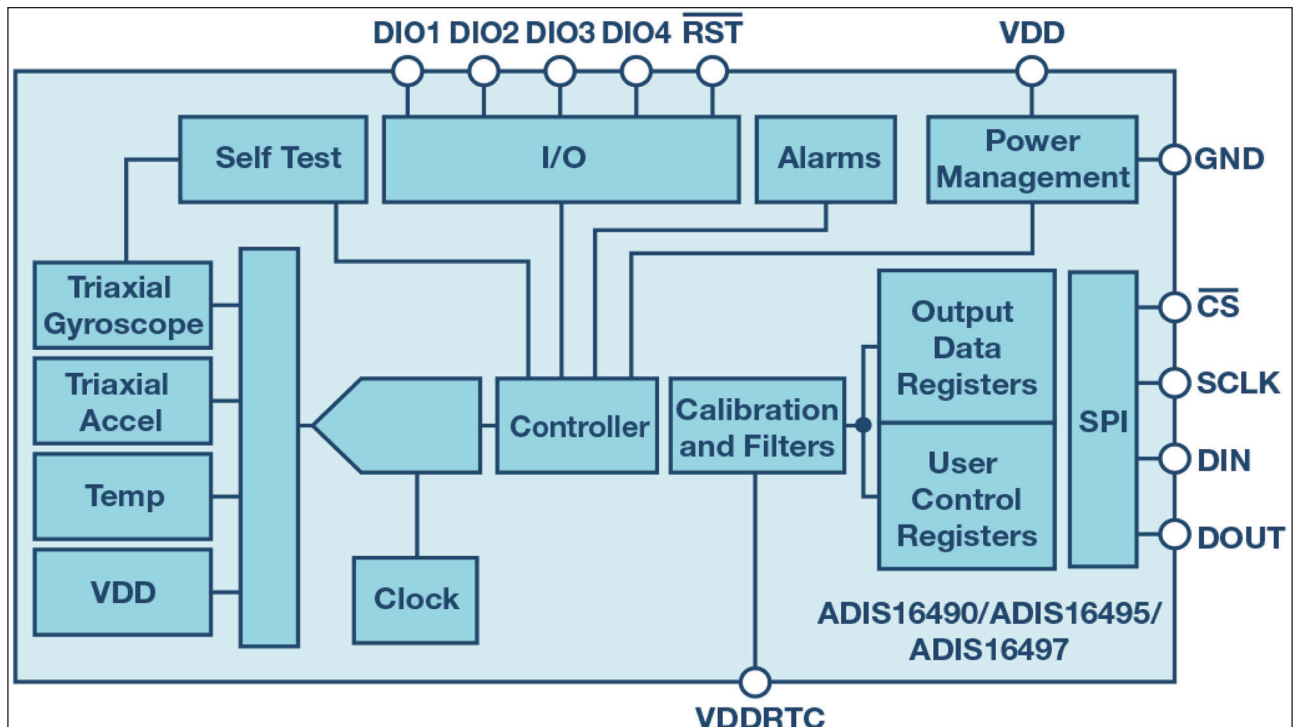
測應用。

穩定

主要標準：雜訊密度、速度隨機遊走、運動中偏置穩定度、偏置重複性和帶寬。

檢測並了解運動可以給許多應用帶來好處。掌控一個系統發生的運動, 然後利用該資訊提高性能

圖 8: 6 自由度 IMU



(縮短響應時間、提高精度、加快運行速度)，增強安全性或可靠性(系統在危險情況下關機)，或者獲得其他增值特性是很有益的。基於運動的複雜性，有大量穩定性應用需要綜合運用陀螺儀和加速度計(感測器融合，如圖 8 所示)，例如 UAV 監控設備和船上天線指向系統等。²

6 自由度 IMU 使用多個感測器，以便彌補彼此的弱點。看起來像是一個或兩個軸上的簡單慣性運動，實際可能需要加速度計和陀螺儀感測器融合，目的是消除振動、重力和其他單憑加速度計或陀螺儀無法準確測量的影響因素。加速度計數據包括重力分量和運動加速度。二者無法區分，但可利用陀螺儀將重力分量從加速度計輸出中去除。為了根據加速度確定位置，需要進行積分，在此過程之後，加速度計數據的重力分量引起的誤差可能會快速變大。由於累積誤差，僅憑陀螺儀不足以確定位置。陀螺儀不檢測重力，因此可用作加速度計的輔助感測器。

在穩定性應用中，MEMS 感測器必須精確測量平台方位，特別是在運動時。圖 9 是一個採用伺服電機校正角向運動的典型平台穩定系統的框圖。反饋 / 伺服電機控制器將方向感測器數據轉換為伺服電機的校正控制訊號。

最終應用將決定所需的精度水平，而所選的感測器品質(消費級還是工業級)將決定其能否實現。區分消費級元件和工業級元件很重要，有時候二者的區別很微妙，可能需要仔細考慮。表 6 顯示了消費級加速度計和 IMU 中整合的中檔工業級加速度計的主要區別。

在某些條件有利且可接受較低精度數據的情況下，使用低精度元件便可滿足性能需要。然而，對

表 6：工業 MEMS 元件對所有已知潛在誤差源進行全面測定，精度水平比較費級元件高出一個數量級以上²

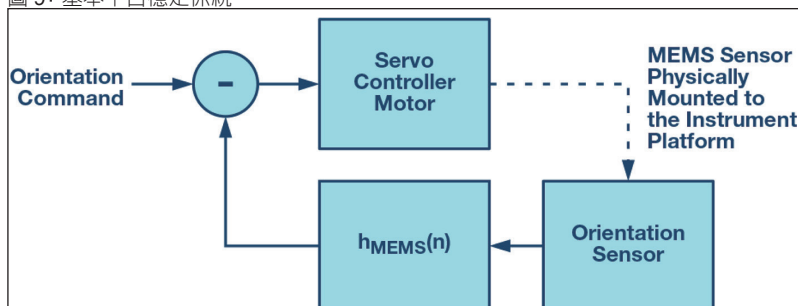
加速度計參數	典型工業規格	相對於典型消費級元件
動態範圍	最高 40 g	3×
雜訊密度	25 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	10×
速度隨機游動	0.03 $\text{m/s}/\sqrt{\text{Hz}}$	10×
運動中偏置穩定度	10 μg	10×
偏置重複性	25 m g	100×
-3 dB 頻寬	500 Hz	2×

能在動態環境中工作的感測器需求迅速成長，較低精度元件由於不能降低實際測量中的振動效應或溫度效應而大受影響，很難達到小於 3° 至 5° 的指向精度。多數低階消費級元件未提供諸如振動校正、角度隨機遊走之類的參數規格，而這些規格在工業應用中恰恰可能是最大的誤差源。

為了在動態環境中達到 1° 甚至 0.1° 的指向精度，設計人員的元件選擇必須聚焦於感測器抑制溫漂誤差和振動影響的能力。感測器濾波和算法(感測器融合)雖然是提升性能的關鍵要素，但無法消除消費級與工業級感測器的差距。ADI 新型工業 IMU 的性能接近於上一代導彈制導系統所用的產品。諸如 ADIS1646x 和已宣布的 ADIS1647x 等元件以標準和迷你 IMU 外形尺寸提供精密運動檢測，鎖定過去的特殊應用領域。

本文第二部分將繼續探討 MEMS 加速度計的重要工作特性，以及它們與穿戴式設備、狀態監測、物聯網、結構健康監控和資產健康監控等應用領域的關係。

圖 9：基本平台穩定系統³



參考資訊

- Long Pham and Anthony DeSimone. "MEMS 加速度計的振動校正" ADI 公司，2017 年。
- Bob Scannell. "高性能慣性感測器助力運動物聯網" ADI 公司，2017 年。
- Mark Looney. "分析穩定系統中的慣性 MEMS 的頻率響應"《模擬對話》，第 46 卷，2012 年。CTA