

工業物聯網智慧邊緣： 減少洞察時間

■作者：Ian Beavers/ADI 公司

減少邊緣節點的洞察時間可在獲得數據之後儘快做出關鍵決定。而理論上處理能力和通訊數據均不受限制，則可將所有全頻寬邊緣節點感測資訊發送至遠端的雲運算伺服器。此外，還可以進行大量運算，以挖掘做出明智決策所需的寶貴細節資訊。然而，電池電量、通訊頻寬和運算週期密集型演算法的侷限使得我們的設想只是一種概念，而無法成為實際方案。

在這個包含多個部分的工業物聯網系列文章中，我們將分解和研究大型物聯網框架中邊緣節點解讀的基本方面：感測、測量、解讀和連接數據，同時還將考慮功率管理和安全性。邊緣節點所需的數據集可能只是一個離散的完整寬頻資訊子集。同樣，數據可以根據要求進行傳輸。高效的超低功耗 (ULP) 處理也是實施任何邊緣節點方案的一個關鍵。

智慧分區模式轉變

工業物聯網及其前身 (機對機 (M2M) 通訊) 的先鋒時代在很大程度上是由雲端平臺這一主要應用推動因素的作用定義的。智慧系統的洞察力以往都只是依賴於雲級能力。實際的邊緣感測器裝置一直以來都相對簡單。然而，由於邊緣節點的低功耗運算能力比雲運算能力的發展更迅速，這個前提目前正在動搖。¹ 邊緣節點如今具有感測、測量、解讀和連接數據的能力。

智慧分區模式正從連接感測器模型向智慧設備模型轉變，從而提供更多的可用架構選項，並允許組織部署工業物聯網，以獨特的方式改進其實體資產和流程。邊緣運算分析 (亦稱為智慧邊緣或解讀)

推動著這一轉變。大規模的工業物聯網部署依賴於一系列安全、高效節能並且易於管理的多樣化智慧節點。

邊緣分析

最優質的傳感數據仍可邊緣化，且無需細心留意邊緣節點分析中應用的要求。邊緣感測器裝置可能會受到能源、頻寬或原始運算能力的約束。這些約束條件將影響到能夠將 IP 堆疊刪減為最小快閃記憶體或 RAM 的協定選擇。這使得編寫程式充滿挑戰性，並且可能需要犧牲一些 IP 性能。

邊緣處理可以是一個分析過程，除了將數據發送至遠端伺服器以進行雲級分析，它還可以作為一種方法，用於分析接近其來源的數據。在數據鏈中儘早地進行即時分析邊緣處理可減少下游有效負載，並縮短延遲。如果初始數據處理可以在邊緣節點進行，那麼就可以簡化所需的數據格式、通訊頻寬以及最終聚集在雲端閘道。通過緊耦合連接至感測器的時間敏感型回授迴路可提供即時處理，從而為更有價值的明智決策作準備。²

然而，這要求提前瞭解清楚需要獲得哪些有價值的具體資訊，才能從感測和測量數據中得到預期結果。此外，由於空間隔離或應用差異，也可能因邊緣節點的不同而不同。事件報警、觸發信號和中斷感測可以忽略大部分數據，只傳輸需要的數據。

時間折舊

貨幣的時間價值是一種概念，即現在的一美元

比未來某一時候的一美元更有價值。類似地，數據也存在時間常數。數據的時間價值是指在這個幾分之一秒感測到的數據與從現在起一周、一天或甚至一個小時之後感測到的數據不同。此類任務關鍵型物聯網範例有熱衝擊感測、氣體洩漏感測或需要採取立即行動的災難性機械故障感測。時間敏感型數據價值在解讀之時開始衰減。有效解讀數據和採取行動的延遲越長，決策的價值將越低。為瞭解工業物聯網的時間折舊問題，我們必須進一步深入瞭解信號鏈。

邊緣感測器節點的處理演算法可對抽樣數據進行篩選、抽取、調諧和精處理，將其分解至最低要求的子集。這首先需要定義目標窄帶數據。可調頻寬、抽樣率和動態範圍有助於一開始就在硬體的類比域中建立基準。透過使用所需的模擬設置，感測只會感測需要的資訊，並提供更短的時間常數以獲得高品質的解讀數據。

邊緣處的數位後端處理濾波器可進一步重點關注目標數據。邊緣感測器處的數據頻率分析可在資訊離開節點之前，並及早判定信號內容。一些高階運算模組執行快速傅立葉轉換 (FFT)、有限脈衝響應 (FIR) 濾波並使用智慧抽取，可縮小抽樣數據的範圍。在一些情況下，在大幅度降低數據頻寬之後，只需要從邊緣感測器節點處傳輸通過或未通過資訊

增量痕跡。

圖 1 中，我們可以看到在未使用前端類比濾波器或數位後端處理濾波器的情況下，抽取 8 次 (左側) 的簡單信號將混疊新的干擾信號 (中間)，從而使頻率折疊成期望的新信號頻帶 (右側)。數位後端處理濾波器搭配數位訊號處理器 (DSP) 或微控制器 (MCU)，同時將半帶 FIR 低通濾波器與抽取濾波器一起使用，將能夠濾除混疊的干擾信號，從而有助於防止出現這一問題。

邊緣節點處理洞察力—智慧工廠

領先的工業物聯網應用解決方案適用於工廠機器狀態監控。該解決方案的目的是在發生故障之前識別和預測機器性能問題。邊緣感測器節點的多軸高動態範圍加速度計用於監控工業機器上不同部位的振動位移。可以篩選和抽取原始數據，在微控制器中進行頻域解讀。可以處理與已知性能極限進行比較的 FFT，針對下游的通過、未通過和警示警報進行測試。藉由 FIR 濾波去除目標頻寬外的寬頻雜訊，可實現 FFT 內的處理增益。

邊緣節點處理是機器狀態監控的一個重要組成部分。抽樣數據的全頻寬是實現無線閘道聚集的一個重要瓶頸。要考慮到，一台機器可能配有許多感測器，並且可能同時監控數百台機器。微控制器中

圖 1：在未使用前端濾波器或數位後端處理濾波器的情況下，可能會出現混疊

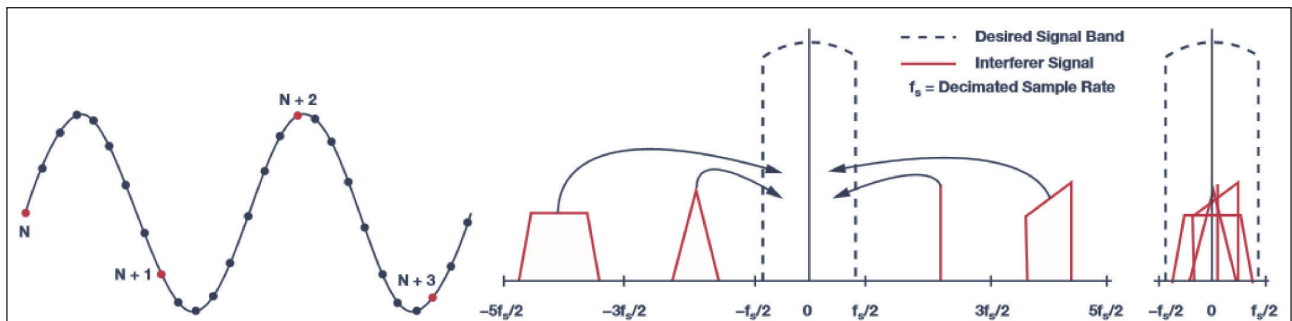
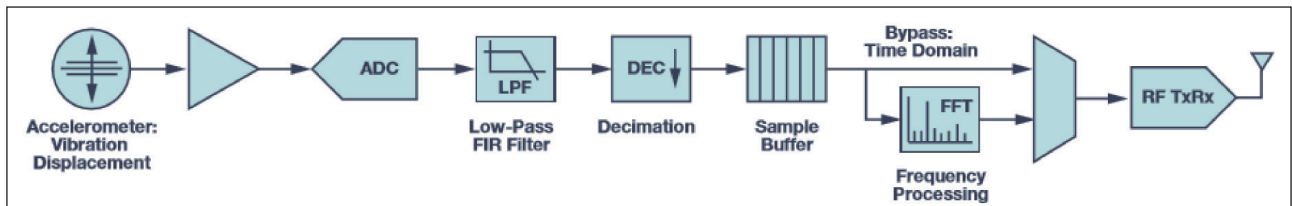


圖 2：振動監控的典型信號鏈。



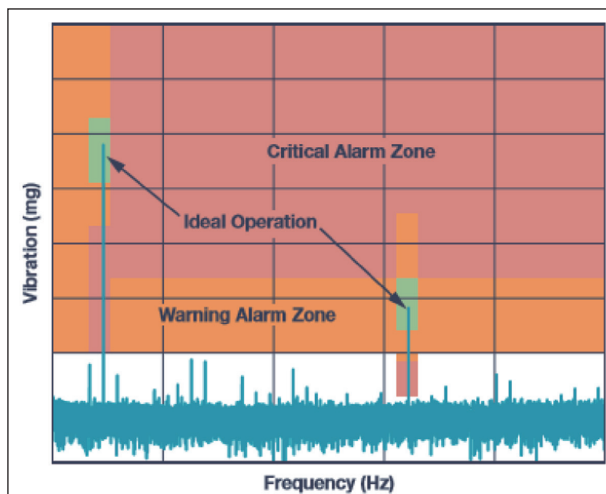
作出的濾波和智慧決策向無線收發器提供一個低增益頻寬輸出，而無需在雲端進行密集型濾波處理。

圖 2 顯示了一個機器狀態監控的信號鏈，在這個信號鏈中加速度計感測器用於測量位移振動特徵。利用邊緣感測器節點處的后端處理濾波器，可通過在濾波和抽樣數據後進行 FFT 運算，從而在目標窄頻寬中完成頻率分析。

在 FFT 運算過程中，與即時示波器一樣，處理濾波器可無視時域活動，直至完成 FFT。第二個執行緒中的另一種時域路徑可能還可用於防止出現數據分析差異。

圖 3 為 FFT 的一個範例。在這個範例中，我們在邊緣節點 MCU 中對不只一個觀察的機械零件進行特定的預定區解讀。在所需綠色區域中達到峰值的能量代表正常運轉，而黃色和紅色區域則分別表示警報和嚴重警報。更低的數據速率警報或觸發痕跡可能會在目的地區域內向系統發出偏移事件報警，而不是傳全頻寬感測器數據。

圖 3：FFT 倉能源可用於觸發警報



動態範圍、標記和精度

邊緣分析的運算功率有幾個選項。許多選項可用於處理演算法，從一個提供有限控制性能的簡單 MCU 到更加複雜的精密系統單晶片 (SoC) MCU，再到功能強大的多核數位信號處理。處理內核尺寸、單核或雙核操作、指令 RAM 快取大小和定點與浮點需求都是典型的技術考慮。通常，需要在節點可用

的功率預估和應用的運算需求之間作出權衡。

針對數位信號處理，採用定點和浮點兩種格式來儲存和操作以數位表示的感測器節點數據。定點是指一種數位表示方式，採用小數點後 (有時候為小數點前) 固定位數的數位表示。使用這種方法的 DSP 處理整數，例如使用最少 16 位元的正負整數，可能有 216 種位元模式。相比之下，浮點則使用有理數，最少可能有 232 種模式。³ 與使用定點的 DSP 相比，使用浮點運算方法的 DSP 可處理更大範圍的值，並能夠表示非常大或非常小的數字。

浮點處理可確保能夠表示更大動態範圍的數位。如果需要運算大量感測器節點數據，並且在感測之前可能並不清楚確切的範圍，則浮點處理就非常重要。此外，由於每一個新的運算都需要進行一次數學運算，所以運算結果必然會出現四捨五入或截斷的現象。這會導致數據出現量化誤差或數位信號雜訊。量化誤差是理想的類比值與該值的數位表示 (即最接近的捨入值) 之差。這些值之間的量化差越大，數位雜訊將越明顯。當準確性和精度對於解讀的感測器數據來說非常重要時，浮點處理則可實現優於定點處理的精度性能。

性能

韌體設計師應以最有效的方式實現運算應用，因為執行操作的速度至關重要。因此，必須描述數據解讀的處理需求，以便確定實現最大效率需要使用定點運算還是浮點運算。

我們可以對定點處理器進行程式設計，使其能夠執行浮點任務，反之亦然。然而，這樣做的話效率非常低，並將影響處理器性能和功率。當針對無需密集型運算演算法的高容量通用應用而優化時，定點處理器的表現更加突出。相反，浮點處理器可利用專門的演算法，輕鬆完成開發，並實現更高的整體精度。

雖然性能不是很高，但是處理器中支援的 GPIO 引腳數量則可作為第二個選擇標準。直接支援目標感測器 (例如：I²C、SPORT 和 UART) 的相

應控制介面可降低系統設計的複雜程度。內核處理時鐘速度、每次執行的位元數、可用於處理的嵌入式指令 RAM 數量以及記憶體介面速度都將影響邊緣節點處理的能力。即時時鐘有助於對數據進行時間標記，並允許調整多個平臺之間的處理。

處理運算能力通常是在 MIPS 或 MMAC 中定義。MIPS 是一秒鐘內可執行的百萬指令數。MMAC 是每秒可執行的 32 位單精確度浮點或定點累加乘法操作次數（單位：百萬）。針對 16 位和 8 位操作，MMAC 性能值分別提高 2 倍和 4 倍。³

安全

雖然工業物聯網的安全影響著每個系統、每次傳輸和每個數據接入點，但是微控制器和 DSP 則提供內部安全特性。高級加密標準 (AES) 提供了一種增強有線通訊線路（如 UART/SPI）或無線通訊線路安全性的方法。在採用無線 RF 通訊的情況下，透過邊緣節點無線電進行有效傳輸之前會先執行 AES 加密。接收節點相應地執行解密操作。電子密碼模組 (ECB) 或密碼塊連結 (CBC) 是典型的 AES 模式。⁴ 通常，128 位元或更長位數的安全金鑰是首選。真亂數產生器用作為處理器中安全運算的組成部分。後續的工業物聯網文章中將進一步描述這些方案的細節，以便大家採用更加全面的安全措施。

單核或雙核

對原始數據處理能力的需求終始很旺盛。高效的原始數據處理能力將更勝一籌。多核 MCU 和 DSP 可為特別受益於密集型並行處理的演算法提供額外的運算能力。然而，處理異質架構數據的需求也在不斷上升。這導致一類多核微控制器的問世，此類微控制器將兩個或更多具有不同特定功能優勢的內核整合在一起。一般稱為異構或非對稱多核設備，通常整合了兩個配置完全不同的內核。

非對稱 MCU 可整合 ARM Cortex-M3 和 Cortex-M0，使用處理器間通訊協定進行通訊。這使 M3 能夠重點處理繁瑣的數位信號處理任務，而 M0

則執行密集程度較低的應用控制。⁵ 這樣可以將更簡單的任務分流至小型內核中處理。分區可最大化功能更強大的 M3 內核的處理頻寬，以便進行運算密集型處理，而這是協同處理的真正核心所在。核間通訊採用共用 SRAM，其中一個處理器引發中斷，而另一個檢查。當接收處理器在回應時引發中斷，就會發出報警。

異構多核 MCU 的另一個優勢在於，它可以克服嵌入式快閃記憶體的限速問題。透過在兩個小型內核中以非對稱的方式對任務進行分割，可在實現內核的全部性能的同時，仍繼續使用低成本嵌入式記憶體。實現嵌入式快閃記憶體的成本通常決定 MCU 的成本，因此可有效地消除瓶頸。在可用的功率預算中平衡處理器需求是工業物聯網邊緣感測器節點設計的關鍵部分。⁵

功率平衡

即使是在可以實現能量採集的情況下，許多工業物聯網邊緣傳感器節點也必須能夠在同一小型電池上運行多年。ULP 操作將是這些節點的一個關鍵參數，而且必須選用能夠最小化節點實際功耗的元件。⁶

許多非常適用於工業物聯網的 MCU 都採用 ARM 系列的 Cortex-M 嵌入式處理器，針對低功耗 MCU 和感測器應用。⁷ 包括針對更簡單高效應用而優化的 Cortex-M0+，以及需要浮點和 DSP 操作的高性能複雜應用的 Cortex-M4。使用性能更高的處理內核可能會影響低功耗性能。

ARM CPU 在代碼大小、性能和效率方面提供了一個新方向。但是對於 MCU 在工作模式或深度睡眠模式下的實際功耗，許多超低功耗能力完全取決於 MCU 供應商。工作功耗深受工藝技術選擇、超快存取記憶體和處理器整體架構的影響。MCU 睡眠電流以及 CPU 處於睡眠模式時的可用週邊功能主要受 MCU 的設計和架構影響。

行業聯盟 EEMBC 制定了一些衡量基準，說明系統設計師瞭解其系統的性能和能量特性，以選擇

最優處理器。每個器件的 ULPMark - CP 評分是經過運算得出的單個數字品質因素。該套件中每個衡量基準的評分使設計師權衡並合計這些衡量基準，以滿足特定的應用需求。⁸

感測器邊緣節點的功率預算將直接與其處理能力相互關聯。如果功率預算無法滿足邊緣節點分析的處理需求，則可能需要作出權衡。性能效率會影響感測器邊緣節點的電源效率。微控制器的典型能耗指標用於指定每兆赫茲運算消耗的有功電流量。例如：針對基於 ARM Cortex-M3 的 MCU，功耗可達到數十 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ 。

工作週期

邊緣感測器節點的功耗最小化通常基於兩個因素：節點在活動狀態下的功耗是多少；以及為進行感測、測量和解讀，節點必須保持活動狀態的頻率如何。這個工作週期將隨著節點中使用的感測器和處理器類型，以及演算法需求的不同而變化。

為了實現快速反應，許多微控制器除了提供完全活動模式，還提供各種低功耗工作模

式，例如：睡眠模式、靈活模式、休眠模式和完全關斷模式。每種模式都將在不需要時關斷各種內部運算模組，通常將電流需求改變幾個數量級。為實

圖 4：邊緣感測器節點 MCU 的主要活動狀態可能會消耗過多的功率。

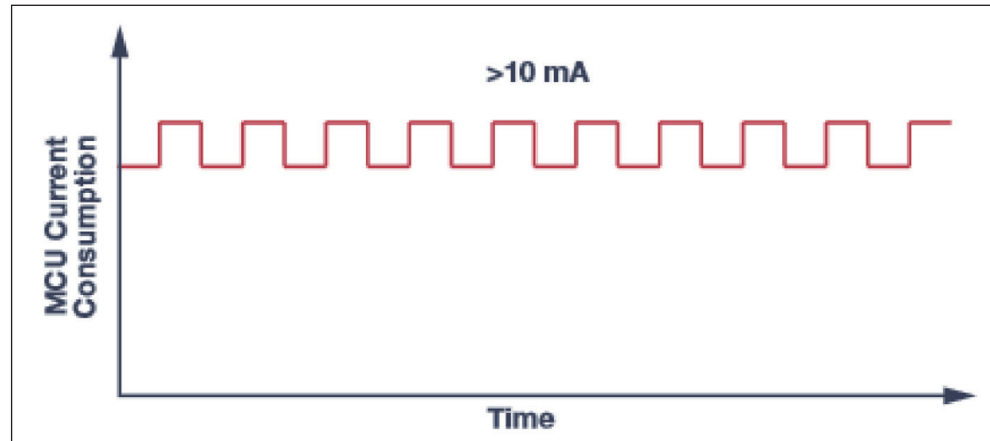


圖 5：將 MCU 主要保持在非活動狀態，以便將功耗降至最小

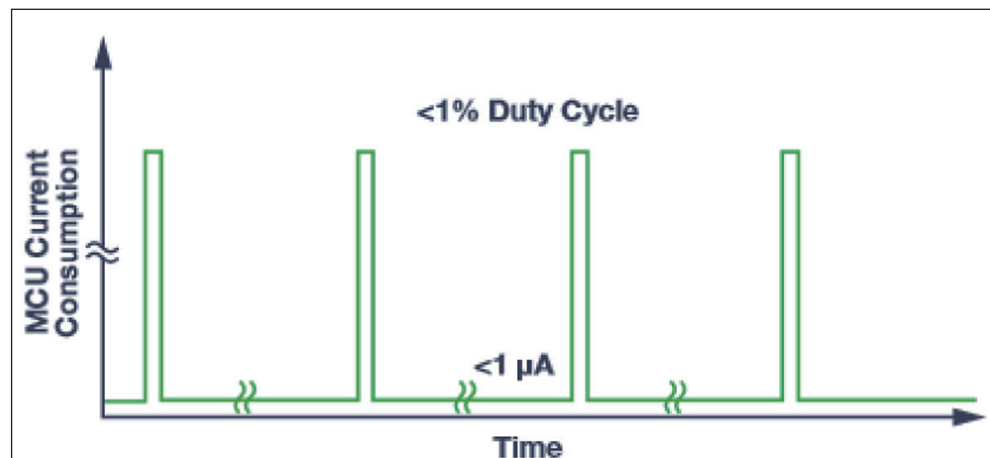
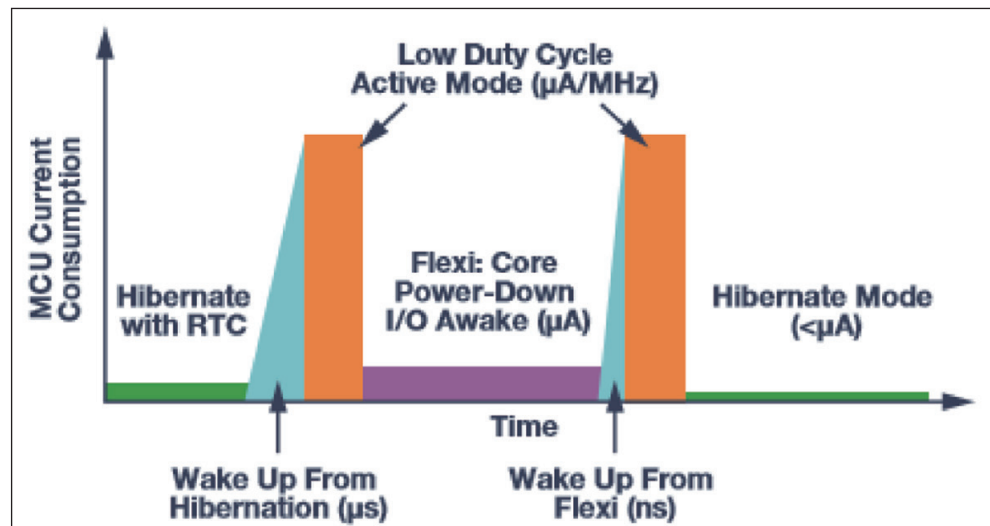


圖 6：詳細的 MCU 功耗與時序圖。



現這一節能優勢，向完全活動模式過渡需要最低有限響應時間。採用靈活模式這一混合配置時，運算內核處於睡眠模式，而週邊介面仍處於活動狀態。休眠模式可提供 SRAM 數據儲存功能，並可選擇允許即時時鐘仍保持活動狀態。

多個感測器的類比信號可發送至單個精密類比微控制器。微控制器中的演算法可通過感測器融合過程實現資訊的智慧組合。

在不考慮 MCU 功耗的情況下，邊緣感測器節點的主要活動狀態將消耗大量功率，並將電池供電應用的壽命減少至只有幾個小時或幾天。

經由分析節點內部元件的工作週期，可節省大量能源，從而確保只有在必須的情況下這些元件才會處於工作狀態。MCU 幾乎一直處於常開狀態。為了使 MCU 能夠保持對邊緣感測器節點的完全控制，同時消耗盡可能少的能量，必須採用針對低能耗操

作的特定架構。最小化 MCU 能耗就是要使 MCU 盡可能經常處於睡眠模式，同時在需要的時候仍能執行關鍵任務。

對於大多數非活動狀態、只在短期佔用時間處於活動狀態的情形，使 MCU 在低功耗休眠模式下運行，可將邊緣節點的電池使用壽命延長至許多年。

可能無需工業物聯網中使用許多邊緣節點感測解決方案就可以處理連續不間斷的數據流程。利用中斷事件臨界值忽略已知的超範圍條件數據，這樣可降低處理功率。為了保持功率和頻寬，可能需要提前瞭解可預測的工作週期。此外，基於已感測資訊狀態的可變工作週期可觸發活動狀態或降低功率狀態。

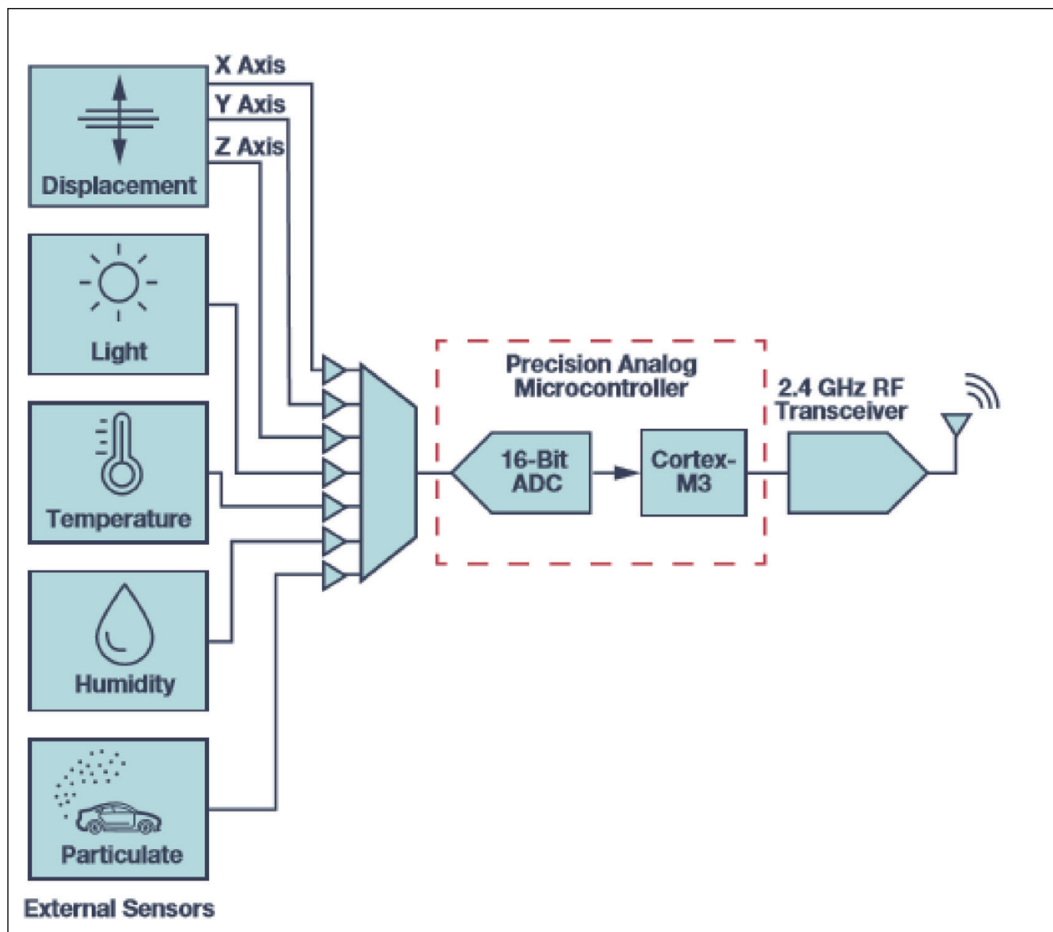
微控制器或 DSP 的回應時間和功耗（開啓和關閉狀態下）是低頻寬應用的重要設計依據。例如：建築中，溫度和光感測器的數據傳輸在靜止期間可

能明顯減少。這不僅可以延長感測器節點的休眠時間，而且還可以大大減少資訊傳輸。

感測器融合

先進的類比微控制器提供了一個完整的混合信號運算解決方案。配備嵌入式精密類比數位轉換器 (ADC) 的前端類比多工器支援更先進的感測器融合技術。在進行數位處理之前，可將多傳感器輸入發送至單

圖 7：在單個類比微控制器中處理多感測器信號。



個微控制器。內建數位類比轉換器 (DCA) 和微控制器回授至附近其他設備，可實現快速反回授迴路。其他嵌入式電路模組 (如比較器、帶隙基準電壓源、溫度感測器和鎖相迴路) 為多感測器邊緣節點提供額外的演算法靈活性。¹⁰

多個感測器的類比信號可發送至單個精密類比微控制器。微控制器中的演算法可透過感測器融合過程實現資訊的智慧組合。

室外污染監控器應用就屬於此類邊緣節點處理。在此類應用中，來自多個輸入來源 (如氣體感測器、溫度感測器、濕度傳感器和顆粒感測器) 的數據在單個處理器中融合並進行分析。透過這些資訊，分析處理完畢後，即可基於只能從本地感測器節點那獲知的校準和補償資訊生成污染數據。然後，可將這些經過校準的數據發送至雲端，以便進行歷史分析。在一些情況下，可能需要進行獨特的一次性偵錯，針對其特定的環境偏移配置每個感測器節點。⁹

ADI 公司對 ULP 平臺進行了大量投資，在感測器、處理器和節能模式的強大功能集方面均有重大改進。近期發佈的 ADuMC3027 和 ADuMC3029 系列微控制器可提供 26 MHz ARM Cortex-M3 內核的性能，同時在活動模式下的工作電流低於 38 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ ，而在待機模式下為 750 nA。這種高效的本地處理能力可降低系統的整體功耗，同時大大減少透過網路發送數據進行分析的需要。⁹

ADI 公司提供各種 MCU 和 DSP 引擎，有助於以智慧方式捕捉和處理發送至雲端的物聯網數據。ADuCM36x 系列採用 ARM Cortex-M3 處理內核和整合型雙核 - ADC。ADI 公司的 SHARC 數位信號處理器系列在許多將動態範圍作為關鍵要素的應用中實現了即時浮點處理性能。⁴

新一代 Cortex-M33 處理器基於 ARMv8-M 架構，採用可靠的 TrustZone 技術，藉由處理器的內建硬體保證可信應用和數據的安全。隨著世界的聯繫變得越來越緊密，確保每個節點的安全性是促進物聯網應用發展的關鍵。

參考資料：

- 1 Michael Porter 和 James Heppelmann。“智慧連接產品如何改變競爭。”哈佛商學院評論，2014 年 11 月。
- 2 Grainne Murphy 和 Colm Prendergast。“精度在物聯網中的重要影響。”ADI 公司，2016 年 8 月。
- 3 Boris Lerner。“定點與浮點數位信號處理。”EE Times，2007 年 2 月。
- 4 數位訊號處理器。ADI 公司
- 5 歐洲編輯。“多核微控制器提升性能。”Digi-Key，2013 年 11 月。
- 6 Oivind Loe。“評估真實環境中 MCU 的能效。”嵌入式，2015 年 10 月。
- 7 Amyas Phillips。“工業物聯網。”ARM。
- 8 物聯網連接，EEMBC 基準。EEMBC。
- 9 Michelle Farrington。自供電物聯網系統的演變。IDTechEx，2016 年 4 月。
- 10 精密類比微控制器。ADI 公司，2008 年 7 月。

作者簡介

Ian Beavers 是 ADI 公司自動化、能源和感測器部 (美國北卡羅來納州格林斯博羅) 的產品工程經理。他於 1999 年加入公司。Ian 擁有超過 19 年的半導體行業工作經驗。Ian 於美國北卡羅來納州立大學獲得電子工程學士學位並於格林斯博羅分校獲得工商管理碩士學位。聯繫方式：Ian.Beavers@analog.com。CTA