



先進 AFE 如何賦能機器人 實現真正的自我感知

■作者：Alec Makdessian

恩智浦半導體市場與應用總監

如果說攝影機、雷射雷達和慣性測量單元 (Inertial Measurement Unit; IMU) 構成了機器人的眼睛與內耳，那麼精密類比測量便是它的“本體感知”——這種悄無聲息的感知能力能夠察覺到電流、應力和溫度，讓您洞悉其真實運行狀態。

在眾多實現這一感知能力的組件中，NAFEB43388 可謂出類拔萃。它是一款穩健的多通道類比前端 (Analog front end AFE)，具備 8 個可配置輸入 (最高支援 $\pm 25V$)、一個 24 位 $\Delta - \Sigma$ 模數轉換器 (ADC)、內置可程式設計增益放大器 (PGA)、面向電阻型感測器的激勵源，以及堅固可靠的電磁相容 (EMC) 與防錯接保護。所有這些特性，均為實現工業級精度與韌性而設計。

它不是攝影機，也不是雷射雷達，更無

法運行同步定位與建圖 (SLAM) 演算法。但如果您的自主移動機器人 (Autonomous mobile robots; AMR) 或人形機器人需要高保真地測量力、應力、電流或溫度，同時還能抵禦電氣干擾，那麼 NAFEB43388 將成為一個出乎意料卻極具戰略價值的構建模組。

裝置概覽及其重要性

- 8 個模擬輸入 (單端或差分)，可配置用於電壓、電流、電阻、RTD 及熱電偶測量
- $\pm 25V$ 輸入範圍，最高支持 $\pm 36V$ 過壓保護
- 24 位 $\Delta \Sigma$ ADC，PGA (1 至 64 個)，集成電壓 / 電流激勵，低漂移基準
- 資料傳輸速率：7.5SPS $\rightarrow$ 288kSPS，在約 72kSPS 時具有 17 位 ENOB；SPI 介面
- EMC 強化型輸入，集成診斷功能、CRC 校

驗，寬溫度範圍 (-40°C 至 +125°C)，採用 6mm×6mm 40 引腳 HVQFN 封裝

簡而言之，工業級資料擷取 (DAQ) 前端解決方案。經過小型化處理，適用於嵌入式系統。它非常適合用於那些需要長時間、穩定且高精度的量測應用，助力機器人延長使用壽命、實現更智慧的載荷搬運，並提升運行安全性。

在邊緣實現更智慧的感知。借助 NAFEB43388，構建更可靠的機器人及工業系統。

自主移動機器人：精度創造價值 永不超載的 AMR 叉車

場景：倉庫中的一台 AMR 叉車駛入棧板下方並開始升降作業。在移動之前，它會檢查安裝在升降平台四周的四個荷重元 (Load Cell)，確認載重狀況是否安全。

NAFEB43388 的作用：荷重元與應變規 (Strain Gauge) 皆屬於橋式感測器 (Bridge Sensors)，對於低雜訊、高穩定度激勵源及精準增益控制有著極高要求。NAFEB43388 提供高精度激勵電源 (Precision Excitation)，可程式化增益放大 (Programmable Gain) 24 位元高解析度數位轉換 (24-bit ADC)，從而能夠分辨負載的細微變化 (例如“第 17 箱貨物稍微偏離了棧板中心位置。”)。

NAFEB43388 具備 8 路輸入通道，可支援

圖說：堆高型 AMR 於運輸前進行載重檢查，荷重元感測將載荷資訊轉化為即時安全決策。



平台、貨叉或桅桿等位置的多點量測，不僅能計算總載重量，還能即時分析重量分布情況，進一步提升平衡控制與操作安全性。

成效：帶來的效益：減少棧板傾倒風險、提升貨物搬運安全性、根據實際載重而非估算重量調整行駛策略、動態優化路徑規劃與行駛速度、改善能源效率與設備壽命。

早期預警：軸承、煞車與電池健康狀態監測

場景：AMR 已連續平穩運行數月。雲儀錶板顯示一個趨勢：在相同速度與負載條件下，馬達相電流略有上升，同時輪邊齒輪箱附近的溫度也出現細微升高。

NAFEB43388 的作用：可同時多工擷取多種高精度感測數據，例如基於分流式電流、RTD、熱電偶以及匯流排電壓，從而將電氣信號與熱信號融合成一個單一的健康度評分。憑藉在 72kSPS 下的 17 位 ENOB，它能夠以足夠快的速度收集資料以滿足診斷需求，同時保持用於無漂移趨勢分析所需的 DC 精度。強大的輸入保護確保在嘈雜的工業電磁干擾環境下依然可靠運行。

成效：帶來的效益：在故障發生前預警潛在問題、將非預期停機轉變為可規劃的維護作業、提升設備可用率與生產效率、實現真正的預測性維護 (Predictive Maintenance) 與狀態維護 (Condition-Based Maintenance)。

此外，其強化的輸入保護與抗 EMI (電磁干擾) 設計，即使在充滿工業雜訊的環境中，也能提供穩定可靠的量測結果。

惡劣的地面條件，脆弱的線纜連接

工廠和倉庫對線纜並不友好：錯接、熱插拔事故以及浪湧現象時有發生。NAFEB43388 具備 ±36V 的過壓耐受能力，以及出色的 ESD

圖說：人形機器人足部力感知通過分散式負載測量，支援平衡控制與早期故障檢測



和浪湧魯棒性，提供了普通 AFE 和 MCU ADC 引腳所不具備的生存餘量。其結果是故障更少，機械、電氣和韌體團隊之間因問題歸屬而產生的爭議也顯著減少。

人形機器人：不僅看見世界，還要感知世界

腳部感知地面

場景：一台人形機器人站在不平整的格柵上。它的攝影機和 IMU 能夠確定其位置，但要保持平衡，還必須瞭解重量是如何在每只腳之間分配的。

NAFEB43388 的作用：多軸足部力 / 力矩感測器 (Force-Torque Sensors) 以及分散式荷重元 (Load Cells)，都能從同步、低雜訊測量中獲益。透過靈活的通道配置與共用激勵源設計，NAFEB43388 能夠精準捕捉極細微的載重轉移變化，例如：

- 重心從左腳移向右腳
- 單腳支撐時的受力變化
- 被外力推擠時的即時力分布調整

這些資訊對於人形機器人關鍵的平衡控制演算法至關重要，尤其是：

- ZMP (Zero Moment Point, 零力矩點) 控制
- Push Recovery (受擾恢復) 控制
- 動態步行與姿態穩定控制

在人形機器人應用中，相較於極高的取樣速度，量測精度往往更加重要。NAFEB43388 採用 Delta-Sigma ADC 架構，雖然存在一定轉換延遲，但對於典型 100 至 500 Hz 控制迴路而言仍完全可接受，同時能提供優異的解析度與長期穩定性。

值得信賴的扭矩量測，但也要了解其應用邊界

場景：某個關節採用了帶應變元件的串聯彈性執行器 (Series Elastic Actuator, SEA)。您需要精確的扭矩以實現阻抗控制 (Impedance Control)。

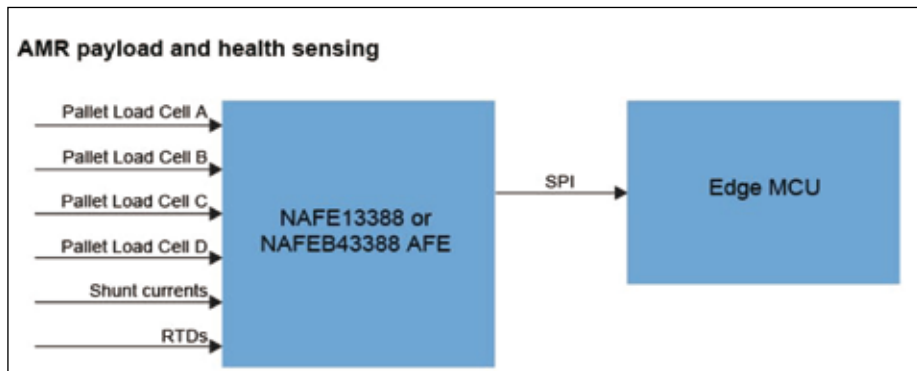
適用性：NAFEB43388 的 24 位 ADC、可程式增益放大器 (PGA)、及激勵源，均為應變計而量身定制。但請勿將其置於內部馬達電流環路中 (5–20kHz)。由於 Delta-Sigma ADC 架構具有固有轉換延遲，其設計目標並非高速即時控制應用。最佳做法是：將高速馬達電流控制交由馬達驅動器內建的 SAR ADC 或電流感測模組負責、由 NAFEB43388 提供高精度扭矩資訊，用於：外層阻抗控制迴路、力控制 (Force Control)、碰撞檢測、安全監控機制。

帶來的效益：提供高精度關節扭矩回授、強化機器人與環境互動能力、提升阻抗控制與力控制性能、支援更安全的人機協作

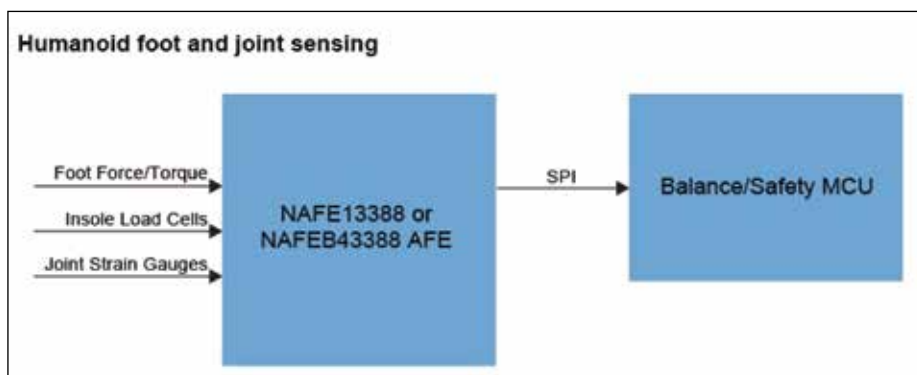
靜默的守望者：熱量、電壓與結構應變

人形機器人功率密度高。在電機端蓋中嵌入 RTD，在逆變器上安裝熱電偶，在承重構件上貼附應變片，能夠在分層或絕緣擊穿之前發出早期預警。NAFEB43388 的校準源與診斷功能，能夠將這些微弱的信號轉化為可操作的遙測資料，而無需設計中使用大量類比輔助板。

圖說：AMR 載荷與健康感測結構框圖



圖說：人形機器人足部與關節感測結構框圖



設計說明：充分發揮 NAFE43388 的作用

選擇合適的資料速率

對於控制環路中的力、扭矩及 RTD 感測，通常有效頻寬為 500Hz 或更低。NAFE43388 支援從 7.5SPS 到 288kSPS 的寬範圍資料速率設置，使您能夠根據濾波器和控制環路的實際需求進行精確選擇，同時兼顧延遲與 ENOB。

充分利用集成式激勵

橋式感測器需要穩定的激勵。與臨時驅動器相比，使用 AFE 內置的激勵源可減少 BOM、節省 PCB

面積、最小化增益與偏移漂移，並通過器件的內部基準簡化現場校準。

快速示意圖：其在堆疊中的位置

不宜使用的場景及替代方案

- 基於雷射雷達、攝影機、雷達及 IMU 的 SLAM 與感知屬於數字、高頻寬領域，在此類應用中，AFE 無法提供附加價值
- 內部馬達電流環路應使用帶有快速 ADC(通常為逐次逼近型 SAR) 的電機驅動器，並搭配隔離式分流放大器；將 $\Delta-\Sigma$ AFE 保留用於外環路與診斷功能
- 擁有數百至數千個觸覺單元的大型觸覺皮膚，需要採用陣列優化的 IC 或矩陣掃描方案，而非 8 通道精密 AFE

上述限制源於 NAFE43388 的轉換模型與通道數量——其優勢在於精度，而非面向高輸送量的任務。

SPI 頻寬預算

8 個通道以高資料速率運行時，資料量將顯著增加。請合理規劃 MCU 上的 SPI 時鐘、DMA 與緩衝；對多點力值讀取採用時間對齊採樣，以避免在平衡或載荷估算中出現混疊。

優先考慮生存能力

該器件的一個顯著特點是具有穩健的前端保護 (ESD、浪湧、錯接)。在佈線時，請注意高壓類比引腳的爬電距離與間隙，並將雜訊較大的功率級予以物理隔離。這樣您就能在實際工廠和倉庫中保持資料手冊級精度。

表：快速對比：AFE 對您的設計而言是否大材小用？

需求	NAFEB43388 適用程度	原因
有效載荷 / 稱重感測器精度	極佳	橋式感測器 + 激勵 + 24 位精度
電池與熱診斷	極佳	支援電壓 /RTD/ 熱電偶混合測量
足部力與平衡 (人形機器人)	良好	高 ENOB；同步多點感測
內部電機電流環路	不佳	$\Delta\Sigma$ 延遲；使用 SAR/ 驅動器 ADC
視覺 /SLAM 感測器	不適用	屬於數字、高輸送量領域
超低成本機器人	超出需求	MCU ADC 可能已足夠

快速評估

恩智浦提供 NAFEB43388 EVK Arduino shield 評估板及示例固件，可快速探索電壓、電流、RTD 及熱電偶等模式，從而減少那些不熟悉類比原理圖的機器人團隊在開發初期所面臨的阻力。

雙機器人對比：小型案例研究

“重量智慧型” AMR

某物流 AMR 曾出現輪子打滑，原因不明。工程師在升降臺上安裝了 4 個稱重感測器，並將其接入 NAFEB43388，從而能夠即時估算有效載荷品質與重心位置。導航棧隨後根據實際品質及重心偏移，對行駛速度與轉彎速率進行限制。成果：在一個月內，打滑干預次數減少了 40%，輪胎磨損也顯著降低。該 AFE 的 $\pm 25V$ 輸入範圍與 EMC 魯棒性，使其能夠在電氣環境惡劣的叉車作業區穩定運行，無需重新設計。

立足更穩的人形機器人

某雙足研究平臺在格柵地板上進行腳尖離地動作時穩定性不足。通過在前腳掌增加分散式稱重感測器，並將其信號經 NAFEB43388 進行同步讀取，控制器能夠檢測到微小的側向負載變化，並在支撐階段調整踝關節阻抗。200Hz 下 $\Delta - \Sigma$ 延遲處於可接受範圍，而內部

校準基準則有助於在板載電力電子設備附近的熱量波動中保持測量精度。

靜默的專家：精準感知，讓機器人“心中有數”

NAFEB43388 並非導航棧中的主角，而是一位靜默的專家，讓您的機器人保持準確、安全且耐用。在 AMR 中，它支持有效載荷精度與基於狀態的維護。在人形機器人中，它賦能力與扭矩感知、平衡控制及健康監測——前提是不將其置於干赫茲速率的電機環路中。在高精度、穩健性與可配置性至關重要的場合使用它。將其與合適的驅動電子器件及控制架構搭配，您的機器人不僅能看得更清，還能更全面地感知和理解自身。



作者介紹：

Alec Makdessian 現任恩智浦的市場與應用總監，負責管理面向工業應用的類比 ASSP。他在半導體行業擁有 20 年的經驗，曾任應用工程師、市場工程師、業務經理、總監及執行總監等不同職務。他的技術專長涵蓋射頻、資料轉換和感測器領域。Alec 擁有德克薩斯大學奧斯丁分校的電氣工程學士學位和碩士學位。

CTA