

人形機器人關鍵晶片

即時控制 MCU、第三代半導體與感測晶片

編輯部整理

現在人形機器人越做越靈活，能走、能抓東西、做複雜作業，不只是靠 VLA 大模型演算法撐場，背後一整套半導體晶片才是硬體底氣。

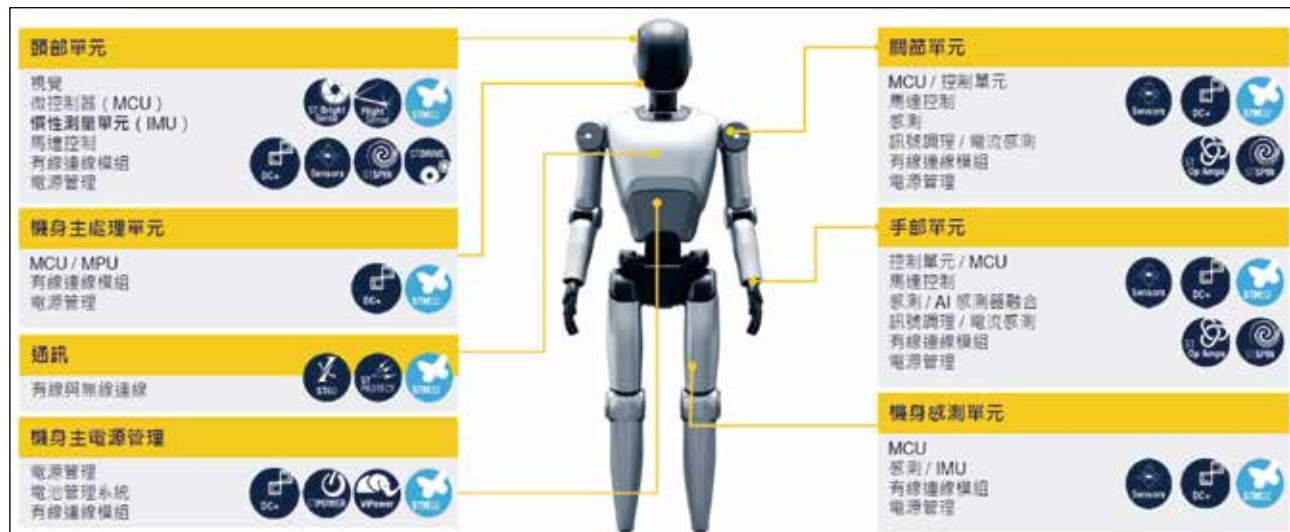
從系統分佈來看（以意法半導體為例），機器人的頭部單元涵蓋了視覺、微控制器（MCU）、慣性測量單元（IMU）、馬達控制、有線連線模組與電源管理；機身部分具備負責核心運算的 MCU/MPU 主處理單元、處理有線與無線連線的通訊模組，以及涵蓋電池管理系統的機身主電源管理。在執行

與感知末端，關節單元與手部單元高度整合了專屬控制單元 / MCU、馬達控制、感測與 AI 感測器融合、訊號調理與電流感測；同時，機身感測單元亦配備了獨立的 MCU、感測 / IMU 與連線模組。意法半導體認為，人形機器人將全機感知、運算與電源精細分佈的設計，充分展現當前隨著具身智能的演進狀況，並反應出人形機器人機電複雜度呈現指數級攀升的趨勢。

隨著具身智能的演進，人形機器人的機電複雜度呈現指

數級攀升。為了支撐全身數十個多自由度（DOF）關節的微秒級同步協調、海量多模態感測器的實時接入，以及千瓦級大模型算力的穩定輸出，傳統的集中式（Centralized）或單一功能域控電子電氣架構已徹底達到物理極限與通訊頻寬的瓶頸。在近兩年的產業革新中，借鑑了高階自動駕駛與軟體定義汽車（SDV）的成功經驗，人形機器人半導體架構全面且決絕地轉向了區域控制架構（Zonal Architecture）。

圖說：完整機器人系統將感知、智慧、動作與電源整合為一體



圖片來源：意法半導體

表 1：單台人形機器人半導體模組與功能

系統模組	核心晶片 / 半導體配置	Zonal 架構下的設計與技術演進
大腦決策算力 (軀幹 / 頭部)	高階智算 SoC (如 NVIDIA DRIVE Thor)， 高頻寬記憶體 (HBM)，骨幹網路交換晶片 (TSN Switch)	承載 VLA 大模型推理與全局路徑規劃，處理 4D Occupancy 龐大數據， 算力需求飆升至千 TOPS 級別。
四肢關節區域控制 (ZCU & 伺服驅動)	邊緣 AI MCU (如 STM32N6, RA8T1)，第 三代功率半導體 (100V GaN 半橋，SiC MOSFET)，高精度 ADC	算力下沉核心，MCU 內建 NPU 處理 局部運控與避障；GaN/SiC 實現關 逆變器微型化與高頻化。
多模態感知與近場通訊 (末端執行器 / 皮膚)	LOFIC 視覺 CMOS，六維力 AFE 訊號調 理晶片，車規級 9 軸 IMU，藍牙 6.0 CS / UWB 安全測距晶片	從單一視覺轉向多模態融合；近場無 源通訊與語義壓縮 (TinyML) 降低數 據傳輸延遲與能耗。
電源管理與高壓保護 (電池包 / 配電骨幹)	高壓 BMS 監控晶片，固態電子保險絲 (eFuse)，智慧火工熔斷器驅動 (Pyrofuse)， 隔離型 PMIC	全面淘汰傳統機械繼電器，eFuse 實 現微秒級過流切斷；支援 800V 高壓 快充至 48V 軀幹的三級配電。

全新區域控制架構

過去機器人所有運算全部丟給軀幹裡的主大腦，線路又多又重，一個零件壞掉整台機器人直接癱瘓。

在 Zonal 架構下，機器人的算力與電源分配不再集中於沉重的軀幹大腦，而是被「下沉」至四肢關節與末端執行器 (如靈巧手、足底) 的區域控制器 (ZCU, Zonal Controller Unit) 中。每個 ZCU 就像一個具備高度自治能力的「神經節」，內部整合了高效能的即時邊緣 MCU、微型感測類比前端 (AFE) 以及固態智慧配電模組 (eFuse)。這些邊緣神經節負責就地收割來自關節編碼器、六維力感測器與局部視覺的高頻原始數據，並在本地完成高強度的運動學反解、馬達閉環控制與預測性維護 (PHM) 計算。處理後的精煉數據 (如

語義 Token 或狀態指令) 再透過 10Gbps 車載乙太網骨幹網 (TSN) 或 AI 原生射頻網路，匯總至位於胸腔的主大腦 (如 NVIDIA DRIVE Thor 智算平台)。Zonal 架構成功將人形機器人體內原本如亂麻般交織的低壓銅線束總長度與重量瘋狂縮減了 40% 以上。這不僅為電池包釋放了寶貴的物理空間，更徹底消除了集中式架構下單點故障的致命風險。

架構的重構直接引爆了單台機器人對高階半導體元件的海量需求。架構改變之後，晶片的成本佔比也水漲船高。根據英飛凌 (Infineon) 的估算，單單憑藉其提供的感知、移動、執行和連接等關鍵半導體解決方案，每台人形機器人中的半導體價值預估即可達 500 美元。同時，根據高盛 (Goldman Sachs) 在近期的權威實體 AI

報告，搭載 VLA 模型的新一代人形機器人，單台機器的半導體晶片成本落在 3000-6000 美元，占到整機物料成本 15-20%，是產業鏈利潤很高的一塊。這幾千美元晶片成本主要分成三大塊：首先是以 NVIDIA Thor 為代表的高算力 GPU/ SoC 佔據了極高的成本權重，它們是具身大模型的算力底座；其次是遍佈全身數十個關節的微型、高頻第三代半導體 (GaN/ SiC) 伺服驅動模組與內建 NPU 的高階控制 MCU，這部分決定了機器人動作的極限流暢度與能效比；最後，則是分佈於視覺、觸覺與空間定位系統中的高精度多模態感知晶片。

即時控制與邊緣 AI MCU 廠商策略

在人形機器人的 Zonal 架構中，主宰著四肢運動極限與

本體安全防護的核心靈魂，是分佈於全身關節的邊緣 AI 微控制器 (MCU)。在近兩年的產業演進中，全球前十大 MCU 供應商敏銳地捕捉到這波「具身智能」紅利，紛紛將戰略重心從傳統的低功耗物聯網，極限切換至以邊緣人工智慧 (Edge AI)、高精度即時伺服控制與車規級功能安全為主導的頂級戰場。這些半導體廠商密集發布了多款旗艦 MCU，已經不再靠純 CPU 跑演算法的陳舊格局，引領機器人運控邁入硬體神經網路加速 (HW based AI)，本地就能處理運動、影像、觸覺數據的全新格局。

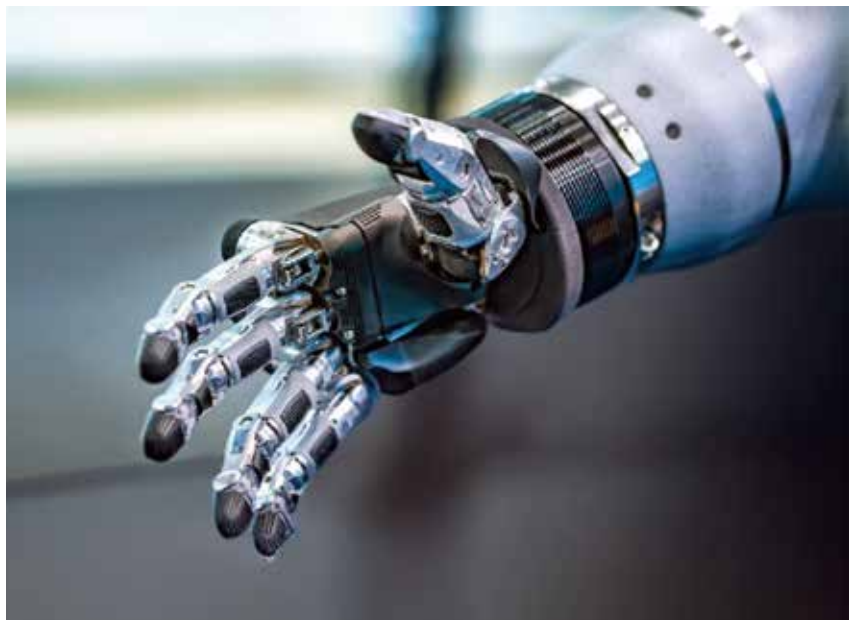
■英飛凌 (Infineon) 作為車用與高階工業控制的領導廠商，其戰略意圖在於將最高級別的系統安全與 AI 推理能力無縫融合。其最新發布的

AURIX TC4x 系列增強版，被產業界視為人形機器人全身骨骼姿態主平衡與核心動力分配的不二之選。TC4x 內部首度硬化整合了強大的並行處理單元 (PPU)，這是一個專為加速矩陣運算與神經網路設計的獨立硬體引擎。它使得 TC4x 能夠在執行極其複雜的多軸步態預測與電池管理 (BMS) 狀態估計時，完全不佔用主 CPU 資源。更為關鍵的是，面對即將到來的量子計算威脅與歐盟等嚴苛法規，TC4x 率先在硬體層面實作了後量子加密 (PQC) 引擎與物理不可克隆 (PUF) 技術，配合其 ASIL-D 級別的功能安全認證，為機器人的底層運動指令構築了堅不可摧的密碼學防護罩。此外，英飛凌進一步擴大與 NVIDIA 的

合作，運用數位孿生 (Digital Twins) 技術，將智慧執行器與特定感測器的高精準模型部署於 NVIDIA Isaac Sim 與 Isaac Lab 模擬框架中。透過結合 NVIDIA Jetson Thor 平台與 Holoscan Sensor Bridge (HSB)，英飛凌不僅提供馬達控制方案，更導入硬體 TPM (可信賴平台模組) 晶片等參考設計，並加入 NVIDIA Halos AI 系統檢測實驗室，確保從邊緣模組到雲端的全鏈路功能安全與網路安全。

■意法半導體 (STMicroelectronics) 則選擇在「邊緣視覺與特徵預處理」領域發起革命。其全面量產的 STM32N6 系列，被 ST 高層定義為未來十年的增長引擎。STM32N6 的核心顛覆在於內嵌了 ST 專屬研發的 Neural-ART 神經網路硬體加速器。這顆堪稱「微型視覺大腦」的 MCU，能夠在關節末端直接進行 720p 影像流的目標檢測與觸覺陣列的模

圖說：英飛凌賦予機器人安全、可靠的感知、移動、執行和連接能力的解決方案



圖片來源：英飛凌

圖說：意法半導體與 Leopard Imaging 合作推出支援 NVIDIA Jetson 的多感測視覺模組



圖片來源：意法半導體

式識別。令人震撼的是，在提供高達 600 GOPS AI 推理算力的同時，STM32N6 在執行 MobileNet 等典型視覺任務時的能效比，相較於傳統依賴 Cortex-M7 核心的方案飆升了驚人的 20 倍以上，其功耗甚至僅為常規應用處理器 (AP/SoC) 的十分之一。這意味著機器人得以將「看見並閃避」的反射神經極限壓縮至微秒級，同時極大地延長了電池續航力。為了加速 Physical AI 系統的全球發展，ST 正將其感測器與致動元件整合至 NVIDIA 機器人生態系。透過與 Leopard Imaging 合作，ST 推出支援 NVIDIA Jetson 與 Isaac 平台的多感測視覺模組 (整合 RGB-IR 影像、IMU 與 dToF 光達)。該方案利用 NVIDIA Holoscan Sensor Bridge (HSB) 簡化資料擷取，並在模擬環境中導入高擬真 sim-to-real 模型，有效縮短虛擬訓練與實際部署的落差。

■瑞薩電子推出的 RA8T1 與 RA8M1 系列，是全球首款搭載 480MHz 超高運作時脈 Cortex M85 核心的 MCU 巨獸。RA8T1 內部集成了 Helium 向量擴展指令集 (MVE)，使其 DSP 與機器學習 (ML) 的運算速度達到了前代 M7 核心的 4 倍以上。這顆專為電機控制調優的晶

片，能夠憑藉極高的數學解算能力，在單一晶片上同時駕馭多個三相無刷直流馬達，執行複雜的空間向量調變 (SVPWM) 與無感測器預測性控制，完美契合人形機器人腿部高動態的步態解算需求。同時，為應對地緣政治與專利壁壘，瑞薩亦積極佈局 RISC V 架構，推出了極低成本的通用 R9A02G021 系列，全面滲透至機器人輔助關節與末端感測器節點。

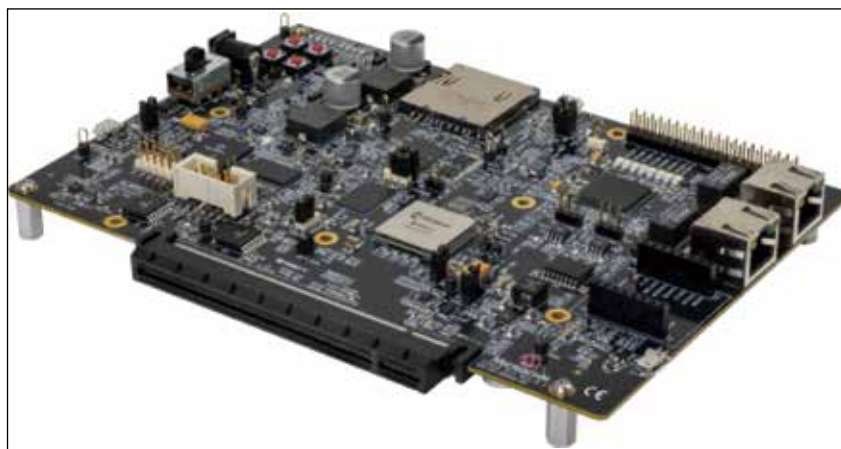
■德州儀器 (TI) 則憑藉其強大的類比基因與成本控制優勢，發布了搭載 TinyEngine NPU 的 MSPM0G5187 系列。透過硬體級神經網路加速，這顆以性價比著稱的晶片將複雜馬達控制演算法的邊緣推論延遲暴力降低了 90 倍，成為驅動機器人全身海量多自由度關節的最具競爭力方案。在感測融合與安全感知方面，TI 亦攜手 NVIDIA 加速下一代實體

AI 部署，將其 IWR6243 毫米波 (mmWave) 雷達技術透過 Holoscan Sensor Bridge 與 NVIDIA Jetson Thor 平台無縫整合。此感測融合方案為人形機器人提供了低延遲的 3D 感知能力，能有效克服傳統攝影機無法穩定偵測玻璃等透明或反光障礙物的盲點，大幅提升機器人在真實世界中運作的安全性。

■恩智浦 (NXP) 的 MCX N 系列微架構，透過雙核 Cortex M33 搭配專有 eNPU 的設計，以極致的功耗平衡與高度整合的周邊資源，穩穩佔據了機器人末端執行器 (如高精密度靈巧手) 與局部區域安全控制的關鍵版圖。這些全球半導體巨頭在邊緣 AI MCU 領域的軍備競賽，共同為具身智能在物理世界的高效能、高安全落地，鑄就了無可替代的硬體基石。

■除了傳統 MCU，在 FPGA 與可程式化邏輯領域，

圖說：Microchip The PolarFire SoC Icicle 開發套件整合了 ROS 2 與 RISC-V 開源架構



圖片來源：Microchip

Microchip Technology 亦積極推動機器人從傳統自動化向自主系統轉型。Microchip 擴展了 PolarFire FPGA 智慧嵌入式視覺生態系統，原生整合了 ROS 2 (機器人作業系統) 與 RISC-V 開源架構，並提供四重 CoaXPress 與 SDI 視訊傳輸 IP 核心。透過極低功耗、高頻寬與先進防篡改嵌入式安全功能，Microchip 成功將智慧嵌入式視覺、多軸馬達控制及時間敏感網路 (TSN) 合而為一，為醫療、工業及協作型機器人 (Cobot) 提供了具備高能源效率且無風扇的邊緣 AI 與即時控制硬體平台。

第三代半導體 GaN/SiC 與智慧保護

在人形機器人邁向高動態運動、敏捷避障與精細作業的演進歷程中，關節伺服驅動系統與整機電氣架構正面臨著前所未有的物理極限考驗。傳統工業機械臂通常採用外置電控櫃或體積龐大的驅動模組，然而人形機器人全身具備 40 至 60 個多自由度 (DOF) 關節，這要求伺服驅動板必須以極度緊湊的形態深度整合於電機外殼或微型關節模組內部。在這種極致緊湊的封閉空間內，傳統矽基 (Silicon) MOSFET 或 IGBT 元件遭遇了難以逾越的物理瓶頸：受限於矽材料本質上

的反向恢復電荷 (Q_{rr}) 與較大的寄生電容，傳統矽基開關頻率通常被限制在 20kHz 至 50kHz 的區間內。一旦強行拉高開關頻率，開關損耗 (Switching Losses) 將呈現指數級攀升，引發嚴重的局部熱聚集，迫使系統外掛沉重的散熱鰭片與大體積的濾波電感電容，這直接摧毀了機器人輕量化與高功率密度的設計初衷。

為了打破矽基材料在熱阻、耐壓與高頻特性上的物理天花板，氮化鎵 GaN、碳化矽 SiC 這兩類第三代半導體就解決這個痛點體：開關頻率可以拉到幾百 kHz 甚至 MHz，濾波零件體積直接縮小一半以上，整機轉換效率可以衝破 98.5%，

表 2：全球半導體廠商機器人運控晶片最新選型對照表

半導體廠商	機器人運控旗艦 MCU 型號	核心與 AI 加速引擎	核心優勢	人形機器人應用部位
英飛凌 (Infineon)	AURIX TC4x (增強版)	500MHz TriCore v1.8 + 並行處理單元 (PPU)	內建後量子加密 (PQC) 引擎與 ASIL D 級別功能安全，PPU 解放主 CPU 算力。	全身骨骼姿態主平衡域控制器、高階電池預測性維護 (BMS)
意法半導體 (ST)	STM32N6 系列	Cortex M 進階架構 + Neural ART 專屬硬體加速器	邊緣視覺與特徵預處理能效較傳統 M7 核心提升 20 倍，提供 600 GOPS AI 算力。	關節末端高頻率視覺 / 觸覺特徵融合、局部避障預處理網關
瑞薩電子 (Renesas)	RA8T1 / RA8M1	480MHz Cortex M85 + Helium 向量擴展指令集 (MVE)	超高主頻專為馬達高階數學解算優化，DSP/ML 效能達前代 4 倍。	高動態雙足步態解算、精密多軸交流伺服馬達高速 FOC 控制
德州儀器 (TI)	MSPM0G5187	Cortex M0+ 高效能調優 + TinyEngine NPU	將複雜演算法邊緣推論延遲降低 90 倍，極致成本控制與類比周邊。	海量多自由度 (DOF) 輔助關節驅動、靈巧手高頻微觀阻抗控制
恩智浦 (NXP)	MCX N 系列 / MCX A18	雙核 Cortex M33 (150MHz) + NXP 專有 eNPU	整合 TrustZone 安全硬體隔離，以低成本提供穩定的邊緣智慧閉環。	末端執行器局部安全防護、低功耗環境數據聚合

發熱大幅下降。在過去一年多的產業實踐中成為了高階關節伺服驅動的必然選擇。根據權威調研機構 Yole Group 發布的功率半導體產業白皮書指出，當伺服驅動系統導入寬禁帶半導體後，開關頻率得以輕鬆跨入數百 kHz 甚至兆赫茲 (MHz) 級別，這使得關節內部濾波被動元件的體積銳減 50% 以上，逆變器系統綜合轉換效率一舉突破 98.5% 的極致水準。

在微型高頻伺服驅動板的具體晶片選型上，德州儀器 (TI) 推出的 LMG210XR022 成為了 48V 低壓關節驅動領域的標竿性突破。這顆 100V 整合 GaN 半橋功率模組，採用極致緊湊的封裝技術，內部直接共晶封裝了兩顆高頻增強型 GaN FET 以及自適應死區時間閘極驅動器 (Gate Driver)。其核心工程價值在於將驅動迴路與開關迴路的寄生電感降至幾十皮

亨 (pH) 的微觀極限，徹底消除了高頻開關時因寄生參數引發的閘極振鈴 (Ringing) 與電磁干擾 (EMI)。這使得機器人靈巧手腕部與手指關節可以在 500kHz 以上的超高開關頻率下穩定運行，將逆變器模組體積壓縮至硬幣大小，驅動模組發熱量驟降 40% 以上，使得伺服控制板能夠真正實現「電機、驅動、編碼器」三位一體的高度緊湊融合。

與此同時，針對機器人下肢大負載關節、膝關節以及軀幹主動力傳輸等高壓大電流動態場景，碳化矽 (SiC) 元件則構建了不可動搖的高壓骨幹。納微半導體 (Navitas Semiconductor) 推行「GaN+SiC」雙輪驅動戰略，其第五代 GeneSiC 系列採用了顛覆性的溝槽輔助平面 (TAP, Trench Assisted Planar) 製程架構。傳統溝槽型 SiC 雖然導通電阻極低，但在機器人瞬態堵轉的高應力衝擊下，溝槽底部極

易發生氧化層擊穿；而傳統平面型 SiC 雖穩定性高，但導通電阻居高不下。Navitas 的 TAP 製程巧妙地融合了兩者精髓，在維持超低導通電阻的同時，將短路耐受時間 (Short Circuit Withstand Time) 極限推升至 8 微秒，徹底攻克了關節在大負載跳躍、劇烈跌落碰撞時容易瞬間拉弧燒毀的行業沉痾。意法半導體 (STMicroelectronics) 則以 VIPerGaN 系列與高壓 STPOWER 溝槽 SiC 矩陣形成互補，透過將高頻 PWM 控制器與 GaN 功率管封裝為單一晶片，全面賦能輔助關節電源的高頻高效轉換，帶動了整機動力系統能效比的代際躍遷。

伴隨著關節驅動功率密度的飆升與整機低壓線束的極致去冗餘，人形機器人的電路保護架構同樣歷經了一場顛覆性的範式轉移。傳統的汽車與機械設備多依賴玻璃管熔斷保險絲、金屬熱熔斷絲以及機械電磁繼電器進行線路保護。然而，在人形機器人

圖說：德州儀器 LMG210XR022 評估模組



圖片來源：德州儀器

圖說：意法半導體 65W 氮化鎵轉換器

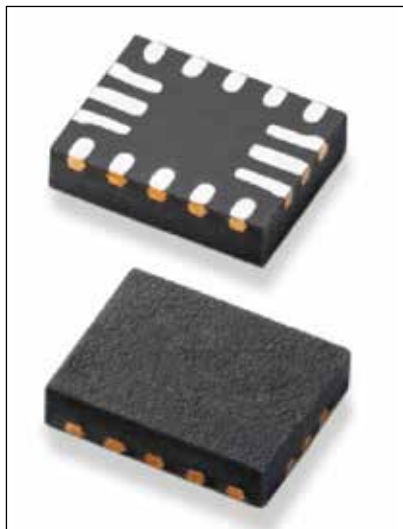


圖片來源：STMicroelectronics

的高動態運行工况下，關節馬達在深蹲起跳、重物搬運時的瞬態峰值電流可能達到額定工作電流的 5 至 8 倍。傳統物理保險絲面臨兩難困境：若額定閾值設定過大，在發生微弱對地短路或絕緣老化時無法及時熔斷，將導致昂貴的伺服電機與晶片被持續大電流烤毀；若額定閾值設定過小，電機啓動時的高動態衝擊波又會造成誤熔斷，且機械保險絲一旦燒斷便無法復原，整機必須拆機維修。更為致命的是，機械繼電器在切斷高壓直流故障時存在長達 10 至 50 毫秒的機械動作延遲，在此延遲期間產生的強烈直流電弧 (DC Arc) 足以熔毀整個區域接線端子。

針對這一安全死角，固態智慧電子保險絲 (eFuse) 與超高速切斷技術在近期的區域架構 (Zonal Architecture) 中實現了對傳統機械防護元件的全

圖說：Littelfuse LS2406ERQ23 為先進的 28V 6A 額定電流限制開關



圖片來源：Littelfuse

面替代。以電路保護全球龍頭 Littelfuse 研發的車規級 eFuse 整合控制晶片 (如 LS2406 與 LS1205 系列) 為代表，該類元件在微型矽片內部深度集成了超低導通電阻功率 FET、高精度電流檢測電路與硬體級過溫保護單元。與傳統物理保險絲依賴焦耳熱融化金屬絲不同，eFuse 採用全數位化閉環監控，其短路響應時間被暴力壓縮至 10 μ s 以內，反應速度比傳統機械繼電器快了千倍以上。更關鍵的是，eFuse 引入了可程式化軟體定義防護機制，能夠透過外接電阻或 I²C 數位總線精確設定電流上限，並具備動態仿生 I²t 熱記憶特性，既能完美包容伺服馬達啓動瞬間的毫秒級正常浪湧，又能在真正的短路故障初發階段精準實施電流鉗位或快速關斷。當線路異常消除後，系統微控制器只需下發一條數位信號即可實現遠端自動復位，徹底消除了人工開箱更換保險絲的運維成本。

在更高層級的電源安全維度，針對人形機器人胸腔主動力電池包 (通常採用高壓高能量密度三元鋰電池組) 與全身配電骨幹的高壓母線短路防護，傳統的熱膨脹切斷機制已無法應對兆瓦級短路峰值能量的瞬間衝擊。為此，德州儀器 (TI) 量產的 DRV3901 Q1 智慧火工熔斷器 (Pyrofuse) 驅動晶片，為整機動力安全構築了最後一

道剛性物理防線。DRV3901 Q1 具備超高抗噪聲幹擾能力與雙軌硬體診斷機制，能夠實時監控母線電流突波，一旦檢測到無法自愈的惡性短路或關節嚴重撞擊導致的相間短路，晶片能夠在 0.5 毫秒內輸出精確的引爆脈衝電流，擊發高壓迴路中的微型火工藥柱。火工氣體在幾百微秒內驅動絕緣衝頭將高壓純銅排直接機械切斷，並依靠腔體內部的強磁滅弧柵瞬態冷卻並熄滅高達數千安培的直流電弧。這種邊緣 eFuse 微秒級可復位保護 + 主母線 Pyrofuse 亞毫秒級不可逆硬核隔離的雙重固態防護體系，成為了高功率人形機器人跨越安全測試認證、進駐高端工業生產線不可或缺的底層硬體依託。

高精感知感測晶片產業鏈

如果說強悍的算力大腦與高頻的伺服小腦構成了人形機器人的骨骼與肌肉，那麼高精度的多模態感知晶片矩陣則是其感知物理邊界、建立環境因果認知並實現精細操作的數位感官。在端到端 VLA 大模型全面接管控制權的技術路徑下，神經網路對輸入感測數據的「純淨度」、「保真度」與「動態範圍」提出了近乎苛刻的要求。任何感測資訊的失真、時序錯位或環境致盲，都會在大模型的多層非線性變換中被幾

表 3：傳統矽基 vs. GaN/SiC 能效、體積與頻率對比表

對比指標	傳統矽基架構 (Si MOSFET / IGBT)	Gan 氮化鎵方案	SiC 碳化矽方案	人形機器人關節效益評估
開關頻率範圍	16 kHz ~ 32 kHz (超過 50kHz 損耗劇增)	200 kHz ~ 1.5 MHz (兆赫茲級極速開關)	100 kHz ~ 300 kHz (兼顧高壓與開關速度)	開關頻率提升 10 倍以上，驅動濾波電感與電容體積縮小 60%。
反向恢復電荷 (Q_{rr})	顯著存在，導致嚴重的開關交叉損耗	理論值為 0(無反向恢復損耗特性)	極低，相較同級別矽基元件降低 85% 以上	徹底消除橋臂直通風險，降低死區時間，輸出電流波形極度平滑。
額定工作電壓 與電流定位	48V 低壓或 600V 中高壓 (性能平庸)	40V ~ 100V 低壓高頻 伺服驅動 (靈巧手 / 手腕)	650V ~ 1200V 高壓大 扭矩伺服 (髖 / 膝關節) 的分層配置。	實現「手腕 GaN 微型化高頻控，下肢 SiC 大扭矩抗衝擊」
逆變器模組功 率密度	<5 kW / L (傳統分立元 件笨重)	> 25 kW / L (晶片級 極限集成)	> 18 kW / L (具備超高 短路過載承受力)	驅動板直接內嵌至電機端 蓋，單關節減重 30% 以上。
系統峰值轉 換效率	93.5% ~ 95.0% (熱損耗 大，需主動散熱)	98.2% ~ 99.1% (發熱量驟降 50%)	97.8% ~ 98.7% (高溫導通損耗極低)	大幅降低散熱系統負擔，有 效延長機器人單次充電作業 時長。
短路與過載 防護響應	依賴外部互感器，延遲 > 10 微秒	奈秒級電流檢測引腳， 支援瞬態保護	槽輔助平面製程提供 溝 8 微秒高短路耐受	保障機器人高動態加減速跳 躍時免受反電動勢與瞬態短 路衝擊。

何級放大，最終引發災難性的物理操作失誤。因此，感知硬體層在過去一年半中經歷了從傳統車用 / 手機感測器向具身機器人專屬架構的深度演化。

在視覺感知領域，機器人從室內暗光倉庫步入烈日暴曬的室外裝配區時，環境光照強度的躍變幅度往往高達 10,000 倍以上。傳統 CMOS 圖像感測器依賴多次曝光合成的 HDR (高動態範圍) 技術，在靜態場景下表現尚可，但在機器人高速奔跑或關節高頻震動時，多幀曝光的時間差會產生嚴重的「運動偽影 (Motion Artifacts)」與邊緣重影；更嚴峻的是，在突遇強光直射或進出背光車間門口時，傳統感測

器存在長達 2 至 3 秒的自動曝光 (AEC) 調整期，這段時長對於具身機器人而言無疑是致命的「全盲窗口」。

為了終結視覺致盲危機，三層疊層結構的橫向溢出積分

電容 (LOFIC, Lateral Overflow Integration Capacitor) 視覺 CMOS 晶片成為了機器人旗艦視覺系統的核心基石。TechInsights 最新拆解分析顯示，LOFIC 技術在光電二極體

圖說：OMNIVISION 的工業和機器人視覺解決方案示意圖



圖片來源：OMNIVISION

微觀結構旁巧妙並聯了一個高密度微型儲存電容。在常規弱光與正常光照下，二極體獨立收集光電子以保證極高的信噪比與暗部純淨度；而當強光襲來導致光電二極體飽和時，多餘的溢出電荷並不會像傳統像素那樣溢散造成畫面死白，而是順暢地流入 LOFIC 電容中進行線性積分儲存。這種微觀結構使得晶片僅憑單次單幀曝光，即可將感測動態範圍推升至突破 140dB 的驚人高度。這意味著機器人在面對汽車廠房高強度弧光電焊作業的同時，其演算法大腦依然能在同一幀畫面中清晰辨識出陰影深處僅有幾毫米寬的螺栓孔位，徹底消除了運動重影與光影突變致盲，為端到端空間佔用網路 (Occupancy Network) 輸送無畸變的高維特徵流。

在靈巧手操作工具、零部件對接以及高精度近場互動維度，傳統依賴大模型視覺反饋的空間估計存在算力開銷巨大與近場視線盲區的缺陷。為此，藍牙技術聯盟 (Bluetooth SIG) 推向商業化的藍牙 6.0 核心規範，憑藉其革命性的信道探測 (Channel Sounding, CS) 技術，在機器人近場測距生態中引發了一場微距感知革命。在此之前，傳統低功耗藍牙 (BLE) 的距離推算完全依賴接收信號強度指示 (RSSI)，但在車間金屬機架與人體肢體的多徑干擾

下，RSSI 測算往往會產生數公尺的荒謬誤差，且極易遭受黑客利用放大器進行中繼偽造攻擊 (Relay Attack)。

藍牙 6.0 CS 技術徹底拋棄了信號強度的玄學估算，轉而採用純硬核的射頻物理相干測量：發射端在多個離散跳頻通道上發送高頻載波，接收端透過高精度解調各頻點信號的相位差 (Phase Based Ranging, PBR)，利用無線電波在空氣中傳播的嚴格物理波長精確解算出空間飛行距離；同時輔以奈秒級往返時間 RTT, Round Trip Time 進行交叉時戳校驗。Nordic Semiconductor 推出的 nRF54L 系列與 Silicon Labs 推出的 EFR32 系列最新晶片，率先完整整合了 CS 硬體測距引擎。它使得機器人的機械夾爪與物料托盤、週邊作業工具之間，無需外掛昂貴的雷射雷達或高功耗 UWB 模組，僅憑一顆幾十美分的標準 BLE 晶片，

圖說：Nordic 公司的 nRF54L 系列提供結合高效 MCU 與超低功耗無線連接功能的 SoC



圖片來源：Nordic

即可在 5 公尺範圍內實現精度高達 ± 0.3 米至分米級的真安全三維測距，且原生支援底層密碼學防偽認證。這種低功耗、低成本、高精度的微距感知，為靈巧手的長尾裝配作業注入了極強的空間幾何確定性。

除了視覺與空間位置，人形機器人執行複雜力控任務 (如表面打磨、易碎玻璃裝配、螺絲精密擰緊) 的絕對命脈，在於手腕與踝關節處的「六維力 / 力矩感測器 (6 Axis F/T Sensor)」。六維力感測器內部利用精密應變電橋 (Strain Gauge)，將三維空間受到的三軸正交力 (Fx, Fy, Fz) 與三軸旋轉力矩 (Mx, My, Mz) 轉化為微弱的電信號。然而，該信號通常處於微伏 (μV) 級別，且極度容易淹沒在周圍大功率伺服馬達 PWM 開關引發的共模噪聲與高頻脈衝干擾中。這對後端信號調理的類比前端 (AFE, Analog Front End) 晶片提出了近乎病態的低噪聲與高線性度要求。

目前全球高端機器人六維力 AFE 晶片基本被德州儀器 (TI) 與亞德諾 (ADI) 為主。以 TI ADS1261 與 ADI AD717x 系列為代表的 24 位元極低噪聲差分 $\Delta \Sigma$ ADC 晶片，內部深度整合了低噪聲可程式化增益放大器 (PGA)、高精度內部基準電壓源與內部數位低通濾波器。其在微弱信號下的輸入失調電壓漂移小於 $0.05 \mu V/^{\circ}C$ ，共模

圖說：ADI AD717x/AD411x 主控台



圖片來源：ADI

抑制比 (CMRR) 超越 120dB，能在關節劇烈運動產生的寬頻電磁噪聲中，毫髮無損地提取出微牛頓級別的應變信號，並以高達數萬次每秒的採樣率輸

出高精度數位矩陣。高集成度的 AFE 使得感測器內部不再需要多級離散運算放大器堆疊，直接將手腕端六維力感測模組的厚度壓縮至 15mm 以內，賦予了機械手如同人類末梢神經般的柔順力覺反饋能力。

審視整體半導體產業鏈的格局分佈，中國大陸供應

商在通用數位邏輯與中低階邊緣運算領域取得了長足進步：以兆易創新 (GD32 系列)、先楨半導體 (HPMicro) 等為代表的本土 32 位元高效能 MCU，在機器人二級輔助關節、軀幹

散熱風扇與基礎電能採集中實現了 20% 至 25% 的替代滲透率。其次，在小腦安全與高頻運控層，具備 ASIL D 功能安全認證、內建硬化 PPU 或神經網路硬體加速器的高階 MCU (如 Infineon TC4x、ST STM32N6、Renesas RA8T1)，海外巨頭的市場佔有率依然高達 80% 以上。

在高精密類比前端與資料轉換領域，六維力感測器專用的 24 位元超低溫漂差分 ADC 與車規級微度溫漂 IMU (如 ADI、TI 方案)，原廠憑藉深厚的類比晶圓製造製程與專利壁壘，掌握了全球超過 85% 的市場配額。

在第三代功率半導體領域，中國大陸廠商在低壓 Si/GaN 平面元件上有較好的產

表 4：人形機器人多模態感知晶片核心參數

感測晶片類型	代表晶片供應商	核心硬體架構	關鍵突破參數與抗干擾特徵	人形機器人裝配位置
超廣動態視覺 CMOS	OmniVision / 索尼定製款 (LOFIC 技術)	三層堆疊背照式 (BSI)，單像素整合橫向溢出積分電容	動態範圍突破 140dB，單幀消除運動模糊，零時差適應光影突變	機器人眼部主視覺鏡頭、胸腔多路環視空間建圖系統
近場微距安全測距晶片	Nordic nRF54 系列 / Silicon Labs EFR32	藍牙 6.0 Channel Sounding 核心，內建相位解算協同單	測距精度達 ± 0.3 米元 (亞米級)，具備物理層密碼學防中繼攻擊	靈巧手掌心、機械夾爪末端、高頻更換工具介面安全對接
六維力感測器類比前端	TI ADS1261 / ADI AD717x 系列	24 位元高精低噪聲 $\Delta \Sigma$ ADC，整合超低溫漂差分 PGA	採樣率達 40kSPS，失調漂移 $< 0.05 \mu V/^{\circ}C$ ，CMRR $> 120dB$	手腕腕關節六維力感測器、雙足腳踝地面衝擊力實時回饋
高抗震動 IMU	ADI ADIS16500 / 意法半導體 ASM330	6 軸 / 9 軸 MEMS 整合，內建三階數位濾波與溫度補償矩陣	陀螺儀偏置穩定性 $< 2^{\circ}/hr$ ，抗機械衝擊高達 2000G	機器人骨盆核心姿態參考單元 (IMU)、頭部慣性防抖平衡
無源超高頻觸覺感測晶片	Wiliot 射頻環境吸能晶片 / NXP RFID	微型超低功耗 SoC，依靠環境微波與射頻電磁波自供電運行	零電池自重，微米級應變感知，支援空間數百個節點並發輪詢	全身柔性仿生電子皮膚、大面積被動觸覺感測外殼矩陣

能部署，但在耐受極限機械振動衝擊的溝槽型 (Trench) SiC MOSFET、車規級大功率氮化矽 AMB 覆銅基板等領域，核心專利與先進襯底外延材料仍高度集中於 Wolfspeed、意法、英飛凌及日本同和金屬等企業。

評估 / 開發平台

STEVAL-ROBKIT1 機器人評估平台



STMicroelectronics STEVAL-ROBKIT1 是一款用於開發機器人技術和應用全面性的機器人評估平台。這款套件的模組化設計包括一塊主板、一塊馬達控制板和一塊影像生成板。

主板由 STM32H725 MCU 驅動，整合多種功能並可控制馬達板和影像生成板。馬達板是架構在 STM32G071 微控制器之上，專用於馬達控制和驅動，使用馬達驅動器來調節機器人的運動速度和方向。影像生成板配備一個飛時測距 (ToF) 感測器和一個攝影機模組，使其能夠感知周圍環境並進行互動。

慣性量測單元 (IMU) 和

磁力計為動態環境中的導引和穩定度提供精確的方向和動作感測。Bluetooth Low Energy (BLE) 模組有助於無線通訊，透過遠端介面進行控制。包含專用的韌體，可讓機器人自主移動並讓使用者可以嘗試各種 AI 演算法。

NVIDIA 專為入門級邊緣 AI 打造的新款機器人電腦 Jetson Orin Nano 2

隨著 AI 模型變得更加精簡且高效，愈來愈多邊緣裝置成為能理解情境、解讀語言與影像，並即時採取行動的自主系統。若要將這些能力導入機器人、配送與巡檢無人機，以及視覺 AI 系統等實體機器，開發人員需要專為邊緣 AI 打造、兼具精巧設計與高能源效率的機器人電腦。

NVIDIA Jetson Orin Nano 2 是專為入門級邊緣 AI 打造的新款機器人電腦，讓全球數百萬名開發人員得以打造機器

人、配送與巡檢無人機，以及視覺 AI 系統，支援前沿物理 AI 應用。Jetson Orin Nano 2 提供 78 TOPS 的 AI 運算效能、8GB 記憶體與 8 核心 Arm CPU，在兼具成本效益與能源效率的系統中，大幅提升 AI 與影片處理效能。憑藉 NVIDIA 開放式軟體堆疊、NVIDIA Jetson 代理技能及豐富的 AI 生態系，Jetson Orin Nano 2 讓開發者能執行針對記憶體高效率邊緣推論最佳化的最新大型語言模型與視覺語言模型，包括 NVIDIA Cosmos、NVIDIA Nemotron、Gemma 4 與 Qwen 3 開放模型，快速打造先進 AI 應用。

已有超過 300 萬名開發人員採用 NVIDIA 機器人技術堆疊進行開發，生態系合作夥伴正開發載板、硬體系統與參考解決方案，協助客戶加速產品上市。

NVIDIA Jetson Orin Nano 2 模組與開發人員套件預計於 2027 年上半年推出。CTA

圖說：NVIDIA 機器人電腦 Jetson Orin Nano 2



圖片來源：NVIDIA