

Application Brief

人形機器人的馬達控制



簡介

在自動化解決方案需求持續增長的背景下，人形機器人具有改變工業環境的潛力。與傳統的固定自動化系統不同，人形機器人在適應以人為中心的工作空間、操控專為人手設計的工具以及在動態環境中與人類安全協作方面，提供獨特的優勢。

然而，若要發揮此潛力，需要解決增加人形機器人關節自由度 (DOF) 的技術複雜性問題。現代人形機器人整合多達 70 個 DOF，以實現近乎人類的靈巧性與機動性，相較之下，工業機械手臂通常僅有 6 至 12 個 DOF。圖 1 顯示人形機器人 DOF 的典型位置。

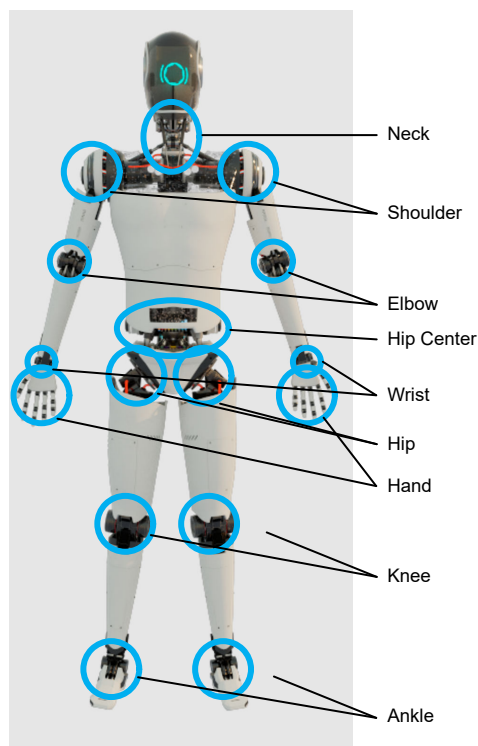


圖 1. 人形機器人中的典型 DOF 位置

支援更多的 DOF 需要精確的致動、感測與控制功能，進而提高系統設計的複雜性。在系統中擁有更多 DOF 需要更多電動馬達驅動器，而馬達驅動器的位置決定了支援其所需要的各種要求。表 1 提供這些關鍵要求的概覽。

表 1. 人形馬達驅動器設計的主要規格

技術規格	重要
通訊介面架構	決定最高達 70 個致動器的系統級協調、延遲和可擴充性。頻寬不足或非即時性的時序會導致運動不穩定與協調失效。
位置感測	為閉合迴路控制提供回饋；其準確度會直接影響運動的精密度和穩定性。解析度不足會導致限制週期振盪和軌跡追蹤性能變差。
馬達類型	定義效率、扭矩密度、控制複雜性和熱特性。馬達的選擇會影響系統性能，電池壽命和外形尺寸。
馬達控制演算法	確定扭矩漣波、效率、噪聲和動態響應。先進演算法可在相同硬體條件下實現更高性能。
功率級要求	定義效率、熱性能和功率密度。低效率的功率級設計會導致過熱、電池續航力縮短以及致動器體積龐大。
電子電路尺寸	確定電子元件是否能容納於擬人化關節的包絡空間內。尺寸過大的電路會妨礙達到符合人體尺度的外型尺寸。
功能安全考量	確保人機互動安全及合規性。安全設計不足會妨礙協作環境中的部署。

在雙足運動和靈巧操作過程中保持動態穩定性也增加了複雜性，這要求控制迴路的反應時間達到亞毫秒級，位置更新頻率為 1-4kHz，電流調節頻率超過 10kHz。

為應對這些挑戰，工程師必須同時將機械、電氣、熱和控制領域同時優化致動器性能，並兼顧尺寸、重量、功耗和成本等方面的限制。嵌入式處理器的選擇也至關重要，它需要協助平衡集中式運動規劃與分散式聯合控制之間的運算工作負載，同時支援確定性即時通訊協定。

通訊介面架構

由於機器人中驅動器的位置，最佳化與所有驅動器的通信，同時最大限度地減少布線量非常重要。實現最佳化的選項很多；最常用的方法是菊鍊通信系統和線性匯流排拓撲，如 圖 2 和 圖 3 所示。

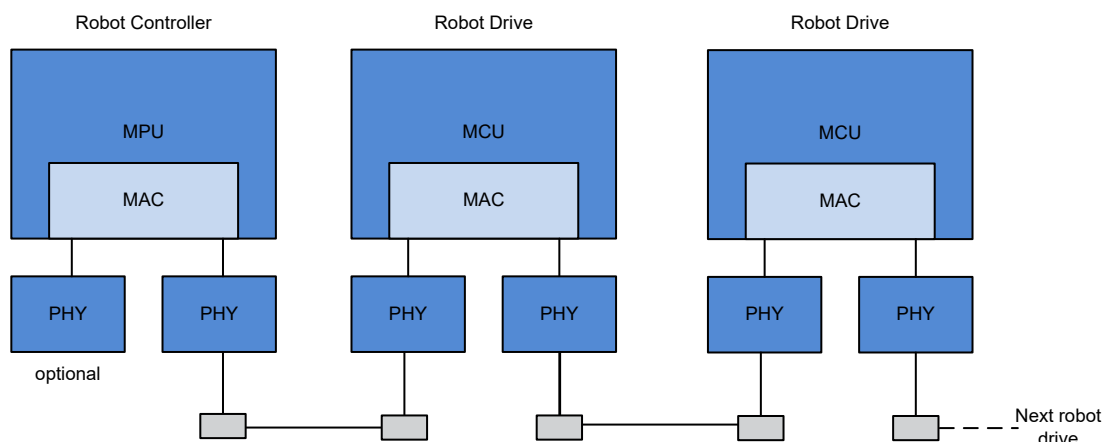


圖 2. 菊花鍊通訊

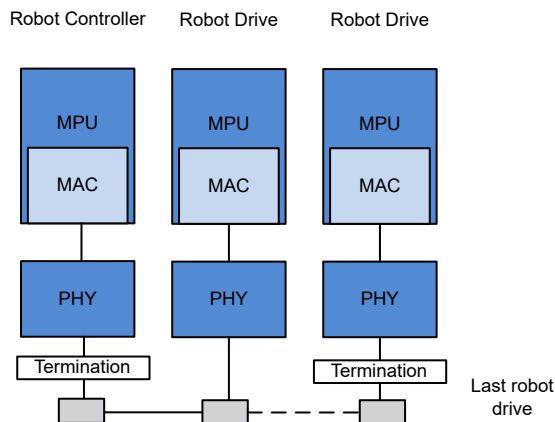


图 3. 线性匯流排拓撲結構

工程師在選擇拓撲結構後，必須考量頻寬、時序與延遲需求，以確保驅動器具備足夠的回應時間。回應時間可根據定義的資料訊框大小，決定所需的即時通訊協定。通訊介面的頻寬需求也會受到如何在分離式馬達驅動器，集中式與外部機器人動作控制器之間分割馬達控制演算法，以將節點間所需通訊框架尺寸降到最低的決定影響。

一般而言，通訊系統的最小頻寬需求約為 8Mbit/s。然而，隨著設計趨勢不斷演進，趨勢顯示對系統診斷與安全功能的需求也與日俱增。

視系統需求而定，人形裝置系統中通常使用的通訊介面為 CAN-FD 或乙太網路 (含 EtherCAT)。TI 提供實體層 (PHY) 收發器和專為啟用這些通訊協定而設計的嵌入式處理器。

[CAN 收發器](#)和 [乙太網路 IC](#) 是人形裝置系統開發中使用的裝置。

位置感測

人形機器人的動作必須接收馬達位置資料，以定義用於控制運動的路徑規劃。為了實現高精確度的受控移動，機器人必須配備轉子位置感測器以擷取馬達上的資訊，並能透過馬達驅動器有效率地將資訊傳送至中央處理電腦。設計師可以根據馬達所需的精密度，選用多種轉子位置感測器。

最常用的編碼器包括：

- 光學編碼器
- 磁性編碼器
- 增量式編碼器
- SIN/COS 解析器

這些編碼器具有不同的介面，可連接至驅動器，並提供執行位置控制所需的轉子角度資料。這些介面需要特定硬體，因此馬達控制處理器需要支援至少下列其中一種編碼器配置：

- 專業序列介面，如 BiSS、Endat、Hiperface 或其他數位絕對編碼器
- 具有解析器介面的取樣和保持功能的 ADC 轉換器
- 適用於增量編碼器的正交編碼器脈衝
- 用於介接磁性編碼器的序列介面

一個馬達可能需要多個編碼器，視馬達和馬達傳動裝置的具體配置而定。TI 同時提供類比和嵌入式處理器及 MCU [MS1]，以啟用編碼器介面系統。位置感測方式採用 [RS -485 與 RS -422 收發器](#)及 [多軸線性與角度位置感測器](#)。

馬達類型

馬達驅動器的設計可將效率最大化，因為人形機器人由電池供電，進而延長機器人的運作時間。

人形機器人若需高功率輸出，可採用 PMSM 馬達等類型。有刷 DC 馬達可用於部分低功耗情況，例如手動和手指控制。然而，目前的設計趨勢顯示未來大多數馬達都將可能採用無刷設計。

PMSM 馬達的設計有兩種選擇：梯形或正弦繞組。這種繞組和控制演算法的選擇會影響馬達控制的精確度。

提高 FET 的切換速度是馬達設計的另一個關鍵點。這種方法提供了新的設計選項，可以提高馬達的扭矩重量比。

馬達控制演算法

選擇馬達類型後，使用者需要確定馬達的控制方式。雖然馬達控制通常與 [圖 4](#) 中所示相似，但實作控制迴路有多個選項，其中顯示所需的類比子系統和處理器周邊設備。

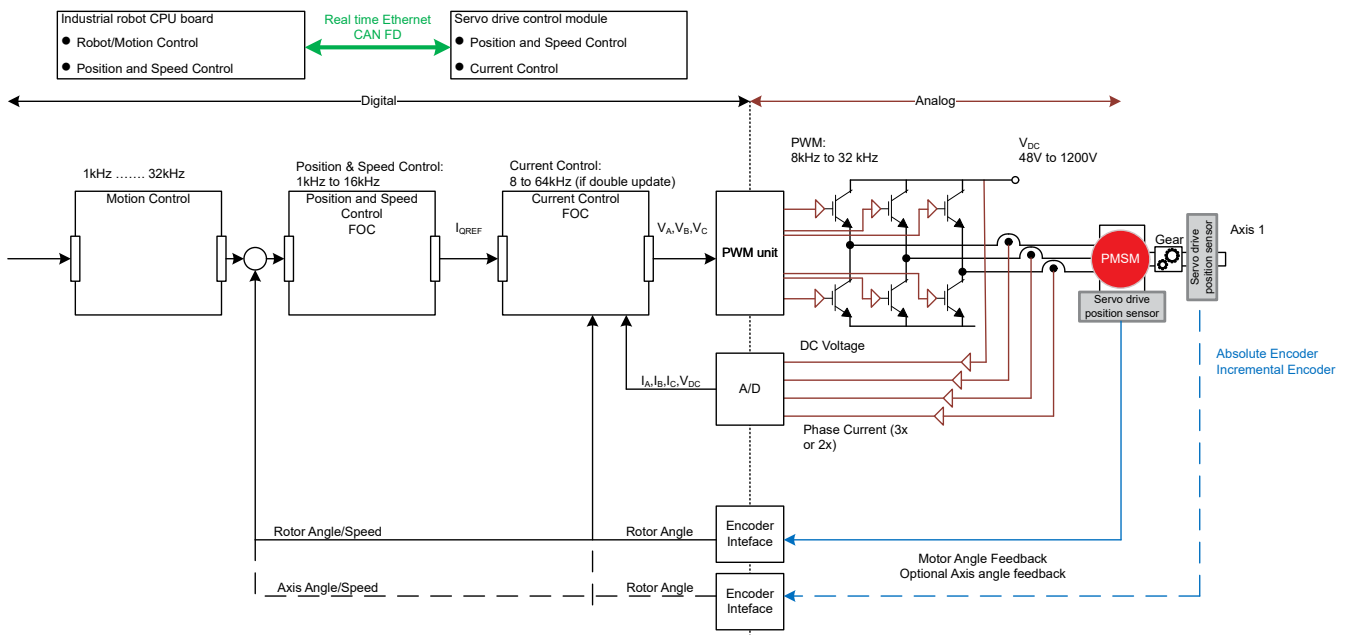


图 4. 機器人控制的即時通訊計時需求

用 图 4 作一般範本，表 2 列出在選擇演算法 FOC 或區塊整流時所需的周邊設備和性能。

表 2. 馬達控制類型的周邊設備和電路需求

馬達類型	有刷馬達	梯形 PMSM	正弦 PMSM
半橋	×2	×3	×3
電流感測	×1	×1	×2 至 ×3
電壓感測 DC 鏈路	×1	×1	×1
角度感測器準確度	≤1°	60°	≤1°
處理能力	低	低	中
效率	低	中	高

TI 擁有許多不同的 MCU，可滿足人形機器人在演算法與角度感測器方面的需求，其中重要的因素包括 IC 的尺寸，以及實現高性能驅動系統的即時能力。C2000™ 即時微控制器和 Arm® 微控制器用於馬達控制演算法。

- **TMS320F28P650DK** : TMS320F28P65x 系列 MCU 具備最多三個 CPU (2 × 32 位元 C28x DSP CPU 和 1 個 CLA CPU) 均以 200MHz 頻率運行，提供與 1000-MHz Arm Cortex-M7 同等的處理能力，以實現即時控制效能。此系列裝置整合了浮點運算單元以及三角數學單元 (TMU)、快速除法單元 (FINTDIV) 和 CRC 引擎等加速器，旨在提升計算效率。F28P65x 系列提供全新超小型 9 x 9 mm² BGA 封裝，並配備整合式 EtherCAT 控制器。此系列已通過 IEC 61508 SIL 2 功能安全認證，且系統能力等級高達 SIL 3。
- **AM2612** : AM2612 MCU 搭載多達兩個主頻 500MHz 的 Arm Cortex-R5F 核心及工業通訊子系統，可提供高效能即時處理與低延遲控制能力。此系列支援 EtherCAT 和 Gbps 時效性網路 (TSN) 乙太網路，並可實現 <2us 超低乙太網路直通延遲。AM261x 系列 MCU 採用小至 10 x 10 mm² BGA 的精巧體積，並已通過 IEC 61508 SIL 3 的功能安全認證。
- **AM13E23019** : AM13E23x 系列 MCU (如 AM13E23019) 是業界首款將高性能 Arm Cortex-M33 核心、TinyEngine NPU 及先進即時控制架構整合於單一晶片的 MCU。這些 MCU 能夠為多達四個馬達保持精確的即時控制迴路，同時利用 TinyEngine NPU 運行適應控制演算法以進行負載感應和能量最佳化。此系列配備整合式三角數學加速器，其計算速度比坐標旋轉數位電腦 (CORDIC) 實現快 10 倍，可提供更精確、更靈敏的馬達控制性能。AM13E23x 系列 MCU 旨在符合 IEC 61508 SIL 2 規範。

功率級要求

人形機器人的功率位準範圍從 4kW 至 10W 不等，大多數驅動器都介於 10W 和 1.5kW 間，具體取決於機器人的驅動位置。

驅動器通常在低於 60V 的 SELV 電壓範圍內運作。因此，元件必須在高達 60V 電壓下運作。為降低放大器、FET 及閘極驅動器系統中潛在雜訊的影響，以高達 100V 運作的元件為佳。

定義驅動器的電氣規格後，還有其他設計考量因素，例如可用於實現印刷電路板 (PCB) 的實體尺寸，溫度管理和電流感測。

小尺寸 IC 和高度最佳化的功率密度設計，是實現小空間設計目標的關鍵。高功率密度會造成機器人潛在的溫度限制，機器人外部不得超過 55°C。在 55°C 下，30 秒內就會發生全厚度皮膚灼傷。溫度管理方法不得包括風扇或液體等額外冷卻。

要在溫度管理與空間限制間取得平衡，必須將功率級設計最佳化以實現最大功率密度，進而直接影響功率級架構。較高切換頻率有助於縮小被動元件尺寸並提升功率密度，但也帶來了散熱方面的挑戰，尤其是對於 MOSFET 而言。與 MOSFET 技術相比，GaN FET 的切換損耗極低，因此可在溫度敏感系統中提供優勢，進而提高理論效率。但提高切換頻率需要 MCU 支援高解析度 PWM 訊號，以在高頻率下維持精確控制。

表 3 列出人形機器人應用的 MOSFET 和 GaN FET 技術的主要特性：

表 3. 適用於馬達驅動器的 MOSFET 與 GaN FET 比較

特徵	MOSFET	GaN FET
切換速度	中等	高
切換損耗	更高	更低
功率效率	良好	非常好
功率密度	中	高
典型應用	通用驅動器	適用於高頻率，空間受限的應用

人形機器人由電池供電，通常採用 48V 額定電壓，具體工作電壓範圍約為 39V 至 54V，視電池充電狀態而定。在 39V 的最低工作電壓下，4kW 驅動器需提供約 102A_{rms} 的電流，以輸出最大功率。這種寬廣的電流範圍，從低扭矩運作期間接近 0A 到峰值功率時超過 100A，都需要在完整操作頻譜中實現精確的電流感測。縮短 FET 失效時間可改善低電流時的量測線性度，進而在整個運作範圍內實現更準確的感測。

TI 提供閘極驅動器，離散式 GaN FET 與整合式功率級解決方案，以解決人形機器人關節在功率和空間方面的多樣化需求。整合式解決方案結合 FET，閘極驅動器，電流感測和保護功能，可降低設計複雜性和 PCB 體積，同時將 EMI 降到最低。這些解決方案讓工程師能夠針對特定的關節位置和功率等級，快速評估 MOSFET 和 GaN FET 技術。

主要 TI 裝置包含：

- [DRV7167A](#)：採用緊湊型 7.00mm × 4.50mm 封裝，適用於 BLDC 馬達驅動器應用的 100V 整合式 GaN 半橋。
- [DRV8378](#)：整合式三相功率級，具有 70V 電壓，整合式電流感測，並支援 FOC，正弦或梯形控制。

電流感測

在評估功率級需求和選擇適當電流感測零件以達到所需性能等級時，電流感測也是重要的設計考量。

TI 提供同相電流感測與低壓側電流感測類比選項，以及如何有效實作系統的設計指南。通常會使用同相電流感測，以隨時維持電流並提高量測精密度。

有三種不同的電流測量選項：

表 4. 適合同相電流量測的典型同相電流感測選項

	電流感測放大器	$\Delta \Sigma$ 調變器	霍爾感測器
性能	高/中	高	中
尺寸	中	中	精巧

對於所有技術類型，電流通常最高可達 200A，具體限制取決於組件的熱性能。

- [電流感測放大器](#)
- [\$\Delta \Sigma\$ 調變器](#)
- [霍爾感測器](#)
- [GaN FET 功率級](#)
- [開極驅動器](#)

有關詳細資訊，請參閱以下技術內容：

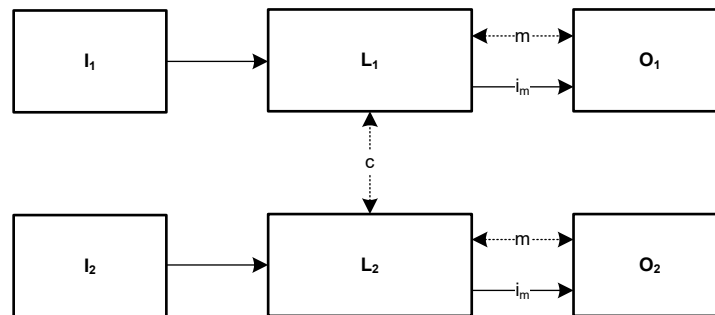
[「適用於 48V 機器人與伺服驅動器的高解析度、小體積相位電流感測」](#)

[「為 3 相位馬達驅動器中分流式電流感測挑選放大器」](#)

功能安全

標準組織應繼續指定人形裝置的安全要求，例如 ISO 25785-1，其旨在解決機器人的行動問題。然而，在定義安全要求之前，人形裝置設計人員必須對目前的系統設計進行盡職調查，以將未來的重新設計工作降到最低。ISO13482，ISO10218 和 ISO 3691-4 可闡明未來的預期。

規劃未來設計時，選擇可簡化功能安全認證的裝置非常重要。ISO13482、ISO10218 和 ISO 3691-4 標準闡明我們對人形裝置未來的預期。兩項 C 類標準 (ISO10218 和 ISO3691-4) 均提及 ISO13849，說明系統必須為 PLd。但是，ISO3691-4 的架構由實施者自行決定，而 ISO10218 則強制要求採用 CAT3 架構。考量這些標準中的最糟情況，人形機器人必須考量至少 CAT3 個 PLd 安全考量。執行 CAT3 系統時，圖 5 中所示的安全架構必須就位。



Key *Illustration from IEC13849-1:2023 figure 10*
 i_m Interconnecting means
 c Cross Monitoring
 I_1, I_2 Input device
 L_1, L_2 Logic
 m Monitoring
 O_1, O_2 Output device
 Dashed lines represent reasonably practicable fault detection

图 5. IEC13849-1 : 2015 圖 10 中的插圖

TI 提供許多裝置與[內容豐富的安全說明文件](#)，讓客戶能夠建置安全啟用的系統。

重要聲明與免責聲明

TI 均以「原樣」提供技術性及可靠性數據（包括數據表）、設計資源（包括參考設計）、應用或其他設計建議、網絡工具、安全訊息和其他資源，不保證其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的擔保，包括但不限於對適銷性、適合某特定用途或不侵犯任何第三方知識產權的暗示擔保。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您將對以下行為獨自承擔全部責任：(1) 針對您的應用選擇合適的 TI 產品；(2) 設計、驗證並測試您的應用；(3) 確保您的應用滿足相應標準以及任何其他安全、安保或其他要求。

所述資源如有變更，恕不另行通知。TI 對您使用所述資源的授權僅限於開發資源所涉及 TI 產品的相關應用。除此之外不得複製或展示所述資源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知識產權授權許可。如因使用所述資源而產生任何索賠、賠償、成本、損失及債務等，TI 對此概不負責，並且您須賠償由此對 TI 及其代表造成的損害。

TI 的產品均受 [TI 的銷售條款](#) 或 [ti.com](#) 上其他適用條款，或連同這類 TI 產品提供之適用條款所約束。TI 提供所述資源並不擴展或以其他方式更改 TI 針對 TI 產品所發布的可適用的擔保範圍或擔保免責聲明。

TI 不接受您可能提出的任何附加或不同條款。

郵寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [ti.com](#) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025