

# Application Brief

## 人形機器人的馬達控制



Kristen Mogensen

### 簡介

製造和服務業對自動化程度的需求不斷增加，推動了人形機器人的開發。人形裝置變得更加複雜和精確，其對周圍環境的自由度 (DOF) 更高，反應時間 (以毫秒為單位) 更短，以更好地模仿人的移動。圖 1 顯示人形機器人的典型馬達和動作功能。

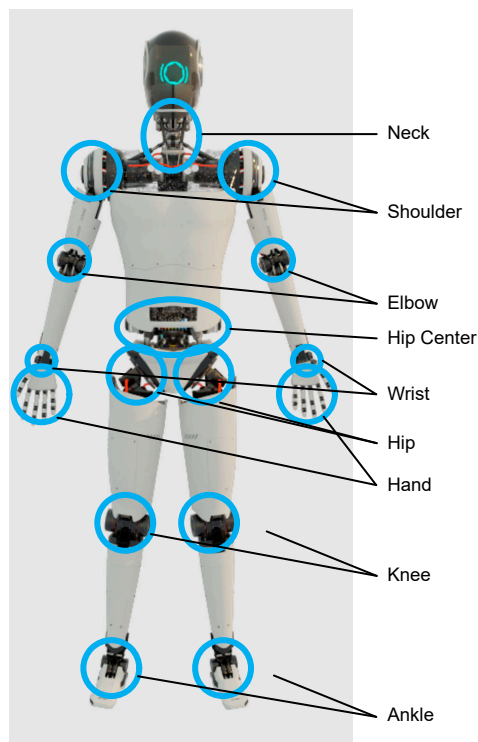


圖 1. 顯示添加到人形機器人 DOF 的位置

擁有更高的 DOF 代表人形機器人需要更多電動馬達驅動器。機器人設計中的驅動器位置定義了驅動器的不同要求。部分主要規格如下：

- 通訊介面架構
- 位置感測
- 馬達類型
- 馬達控制演算法
- 功率級要求
- 電子電路尺寸
- 功能安全考量

雖然有協作機器人和工業機器人的標準，但目前還沒有定義人形機器人功能安全要求的標準。預期未來標準組織會隨著需求持續增加，規定人形機器人的安全要求。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。

## 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；最常用的方法是菊輪通信和線性匯流排拓撲，如 图 2 和 图 3 所示。

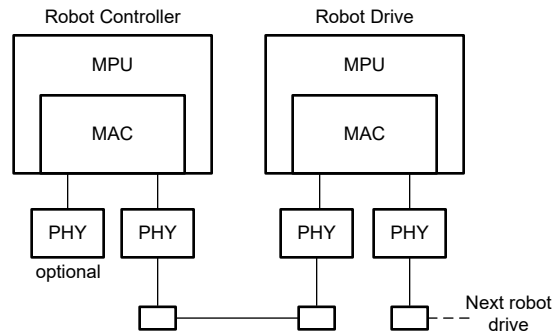


图 2. 菊花輪通訊

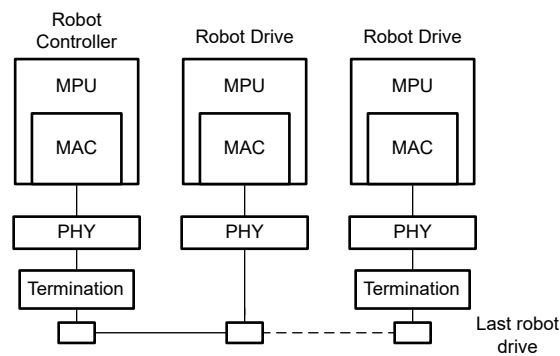


图 3. 線性匯流排拓撲結構

選擇拓撲結構後，要獲得足夠的驅動器響應時間，請考慮頻寬，時序和延遲要求。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。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，以定義路徑規劃。位置資料可讓人形機器人以受控方式移動。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。根據馬達所需的精密度，使用各種轉子位置感測器。以下是一些最常用的編碼器：

- 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，視馬達和馬達傳動的實作方式而定。TI 同時提供類比和處理器 IC，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

由於人形機器人是藉由電池供電，因此馬達驅動器的設計可將效率最大化，以延長機器人的運作時間範圍。

在使用高功率位準時，人形機器人可整合 PMSM 馬達等馬達。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所有馬達都將採用無刷設計。

PMSM 馬達有兩種選擇：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。

馬達設計的另一個重要主題是選擇更快速切換 FET，進而產生可提升馬達每重量扭力的全新設計選項。

## 馬達控制演算法

選擇馬達類型後，使用者決定如何控制馬達的方法。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。

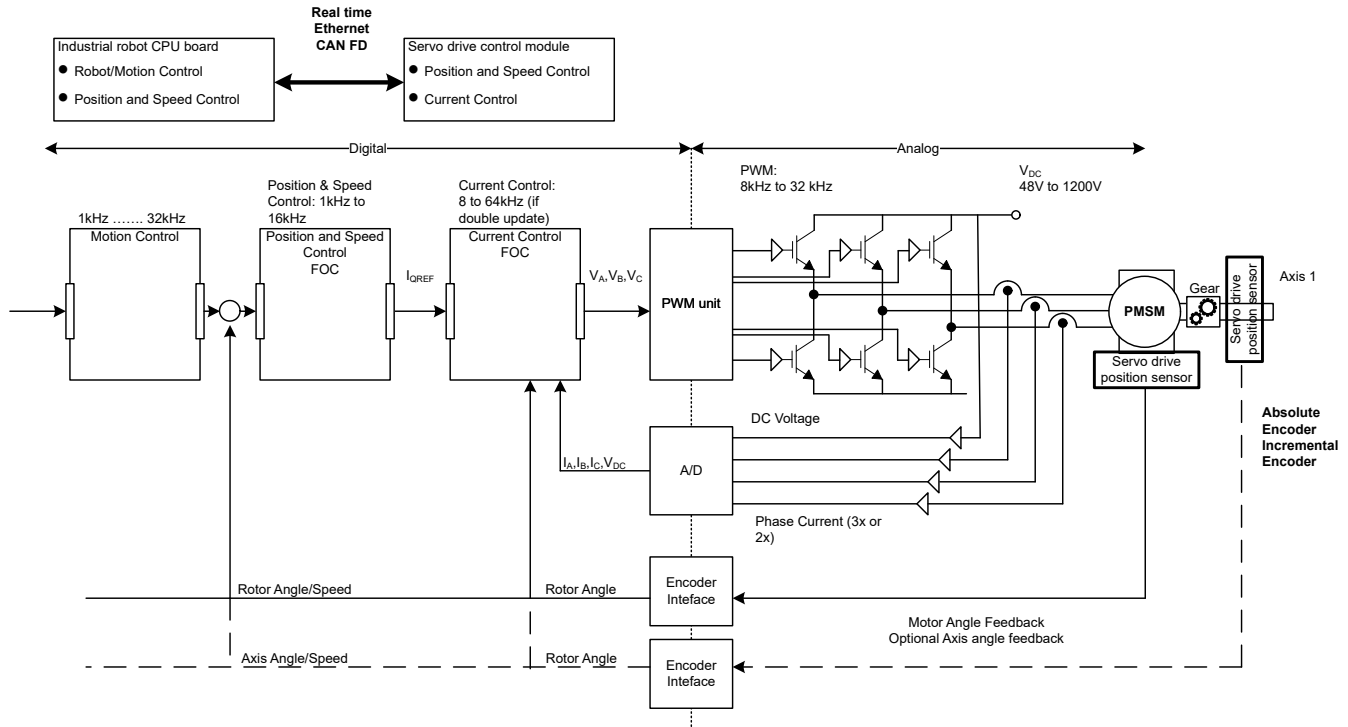


图 4. 機器人控制的即時通訊計時需求

用图 4 作一般範本，表 1 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 1. 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	低等	低等	中
效率	低等	中	高等

TI 擁有許多不同的 MCU，皆符合演算法與角度感測器需求，重要的因素為 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。

### 功率級要求

根據機器人的驅動位置，功率水平在 4kW 至 10W 之間變化，大多數驅動器介於 10W 和 1.5kW 之間。

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，還有其他設計注意事項。

可實作印刷電路板 (PCB) 的實體尺寸是另一項設計考量。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。

溫度管理與空間之間的平衡，則需在功率級與每尺寸瓦特數間取得平衡，進而影響功率級架構。其中一個可能會產生的問題是功率級是否需以更高的頻率運作。此問題通常會出現在 MosFET 中，但與 MosFET 架構系統相比，GaN FET 等新技術也可提升切換性能。就溫度敏感系統而言，GaN FET 的理論效率較高，因為與 MosFET 技術相比，切換損耗最小。頻率增加會導致 MCU 需要其他功能，以支援必要的訊號，以足夠高的解析度實現更高的頻率切換。

TI MosFET 閘極驅動器能讓客戶以最高速度切換 MosFET，而 TI 低電壓 GaN FET 則能讓客戶快速比較並考量機器人中各位置的最佳 FET 類型。

需要高性能 MosFET 或 GaN FET 來實作驅動，進而提升馬達效率。精密的演算法有助於減少馬達 FET 的切換需求與損耗。

人形機器人由電池供電，電壓通常為 48V，或約介於 39V 至 54V 之間，待電池充電狀態開始前。使用的電壓取決於電池電量設定為最小使用量的級別。在提到驅動器在 39V 時所需的最大功率為 4kW 之前，可以看出機器人驅動器需要在約 102Arms 電流下進行最大工作以提供所需功率，但也需考量 0A 附近的精確測量，因此減少 FET 的失效時間也有利於 0A 周圍的電流量測線性度，使低電流時的測量更為精確。

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 2. 適合同相電流量測的典型同相電流感測選項**

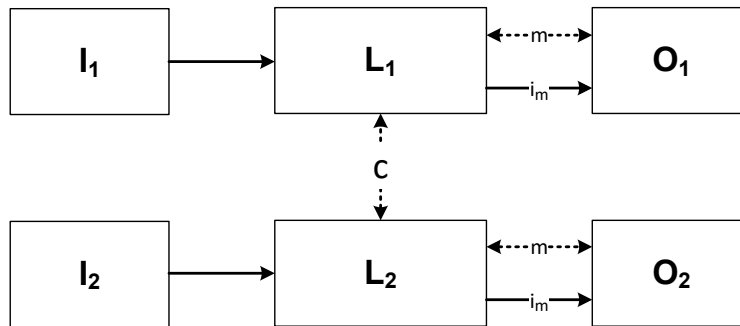
	電流感測放大器	$\Delta \Sigma$ 調變器	霍爾感測器
精密度	中	高等	低等
電流等級	50 A	50 A	100 A
PCB 難度	中	中	低等

就電流感測放大器與  $\Delta \Sigma$  調變器而言，由於元件經過改良，這些技術的電流位準使用會緩慢移至 100A 左右。

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

### 功能安全

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。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

**圖 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。

### 範例系統

在图 6，方塊圖顯示了採用 TI 元件解決 1.5kW 系統設計的解決方案建議，可使用下列元件。

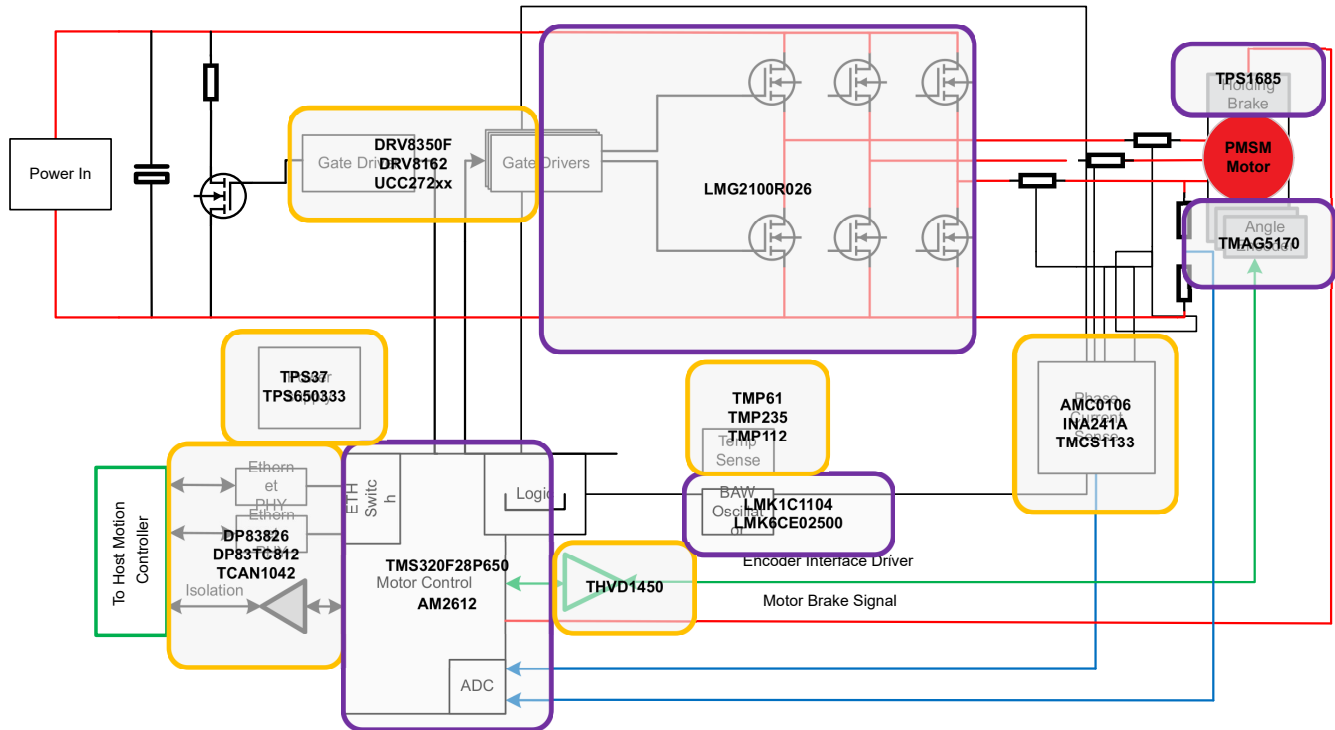


图 6. 展示系統實作的潛在零件的馬達驅動器解決方案

如需詳細零件資訊，請參考下列 TI 設計和 EVM 以查看系統級性能結果：

- [TIDA-010936](#)
- [TIDA-010956](#)
- [LAUNCHXL-F28P65X](#)
- [DP83TC812-IND-SPE-EVM](#)
- [TIDA-060040](#)

## 摘要

人形機器人驅動器的設計需要考量精確性、靈活性和創新。德州儀器提供全方位的積體電路代表產品，讓工程師能夠在打造能夠與機器人環境無縫互動的機器人時，符合各種設計規格。TI 擁有廣泛的評估模組，參考設計和安全認證裝置，可簡化開發程序，協助加快上市時間，並有信心地獲得功能安全認證。與 TI 合作，將幫助您實現更智慧，更快速且更安全機器人的願景。

## 註冊商標

所有商標均為其各自所有者的財產。

## 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 DATA SHEETS), 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 will 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](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.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.

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

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated