

Application Brief

GaN FET 在人形機器人中的應用



Eason Tian, Kyle Wolf

簡介

人形機器人整合了許多子系統，其中包括伺服控制系統，電池管理系統 (BMS)，感測器系統，AI 系統控制等。將這些系統整合至人員體積中，同時維持複雜系統的平穩運作，要符合尺寸與散熱需求是極富挑戰性的。人形機器人中空間最受限的子系統是伺服控制系統。為了達到與人類類似的運動範圍，機器人中通常部署了約 40 部伺服馬達 (PMSM) 和控制系統。馬達分佈在身體的不同部位，例如頸部、軀幹、手臂、腿部、腳趾等。此編號不包括手中的電機。若要模擬人的手自由度，一隻手即可整合十幾個以上的微馬達。這些馬達的功率需求視執行的特定功能而定；例如，驅動機器人手指的馬達可能只需要幾安培，而驅動髖部或腿部的馬達則需要 100 安培以上。

與傳統伺服系統相比，人形機器人的伺服系統具有更高的控制精度、尺寸和散熱要求。本文說明 GaN (氮化鎵) 技術在馬達驅動中的各種優勢，並展示 GaN 如何協助解決人形機器人伺服系統所面臨的挑戰。

更精確的控制

在伺服馬達驅動應用中，馬達控制通常可分為幾個控制迴路層：電流/扭力迴路、速度迴路、位置迴路及更高階的動作控制迴路。這些迴路通常以串接方式配置，每個都有自己的「即時」處理需求。電流或扭力迴路是最快的控制迴路。每個上游迴路在該迴路前會有多個迴路運作，並提供輸入參考至下游迴路。圖 1 說明典型的串接控制拓撲。

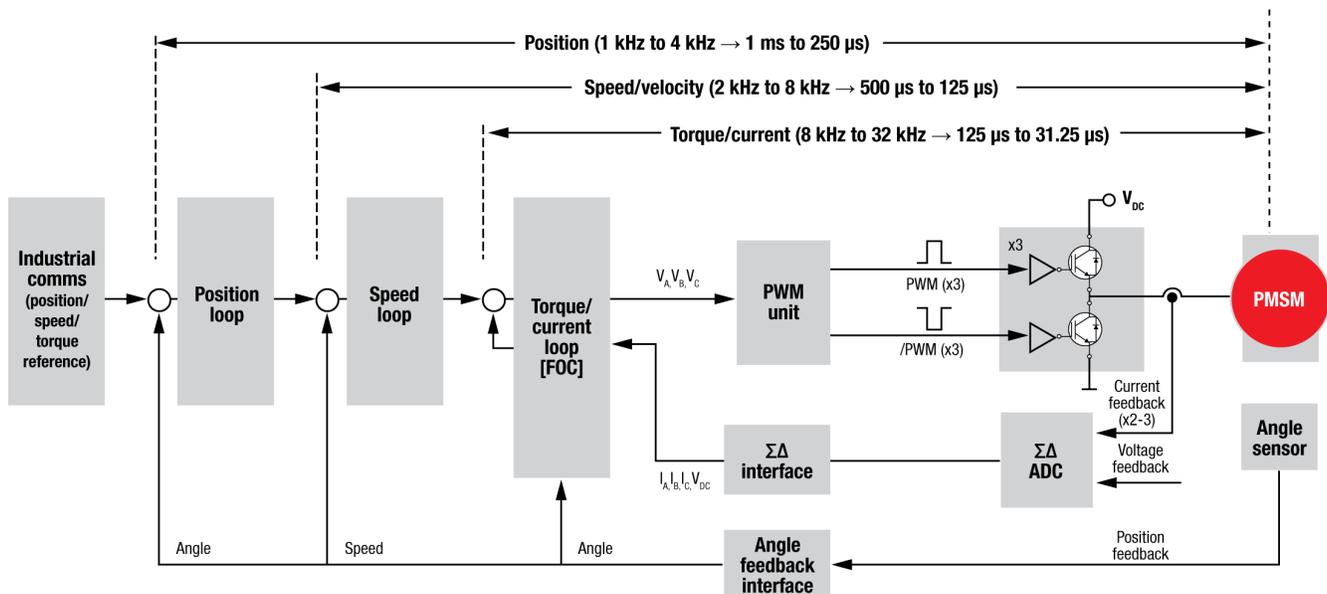


图 1. 典型伺服馬達控制迴路工藝

控制迴路最重要的部分是電流迴路。FET 切換頻率通常與電流迴路相同，約為 8kHz 至 32kHz。電流迴路的速度會直接影響馬達控制的準確度和回應速度。人形機器人的簡單動作包含控制許多伺服馬達。為了在機器人體中協調將近 40 個馬達，同時維持系統穩定性，每個接頭的控制精度和反應速度必須符合非常高的要求。提高馬達控制迴路速度和 PWM 頻率，即可滿足這些需求。例如，100kHz (圖 2) 的切換頻率可以實現更高的解析度電機電流，對應較小的電機電流漣波和更精確的控制。高解析度馬達電流波形也代表正弦波電流更佳，可提升馬達的運作效率並減少馬達加熱。

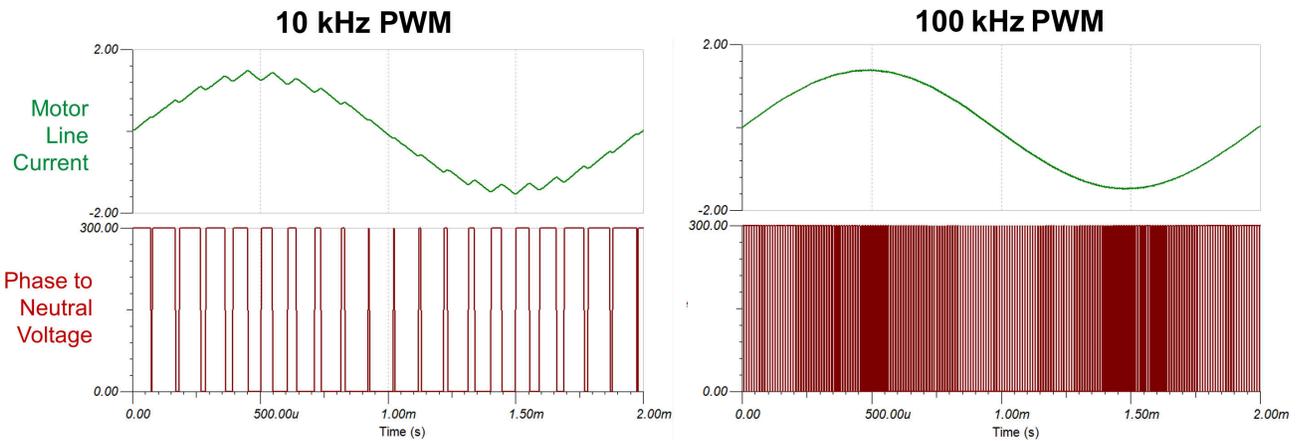


图 2. 100kHz 和 10kHz PWM 馬達電流

此外，提高 PWM 切換頻率可減少 DC 匯流排電容器尺寸和電容。以陶瓷電容器取代電解電容器的匯流排電容需求較低。伺服功率級 FET 會定期利用 PWM 訊號從匯流排電容器汲取電流。PWM 頻率增加時，每單位時間消耗的電荷量會變小，代表所需的匯流排電容也會減少。根據 TIDA-010936 的測試，將 PWM 頻率從 20kHz 提高到 80kHz 後，電解電容器可以用相等電容的陶瓷電容器替換，以獲得類似的匯流排電壓漣波。陶瓷電容器比電解電容器具有明顯的優勢：尺寸更小、使用壽命更長、高頻率特性更佳等等。

因此，在設計人形機器人時，必須考量更高速的電流迴路和 PWM 頻率。對 MOSFET 架構伺服驅動器而言，PWM 切換頻率增加會帶來大量額外損耗，造成驅動器嚴重加熱。當切換頻率從 10kHz 提高到 20kHz 時，MOSFET 型驅動器的整體損耗會增加 20% 至 30%，這是人形機器人無法承受的。或者，GaN FET 也可在高頻率下提供低切換損耗。在 TIDA-010936 測試中，在 40kHz 和 80kHz 時電路板損耗幾乎相同，因此 GaN 特別適合高切換頻率情境。

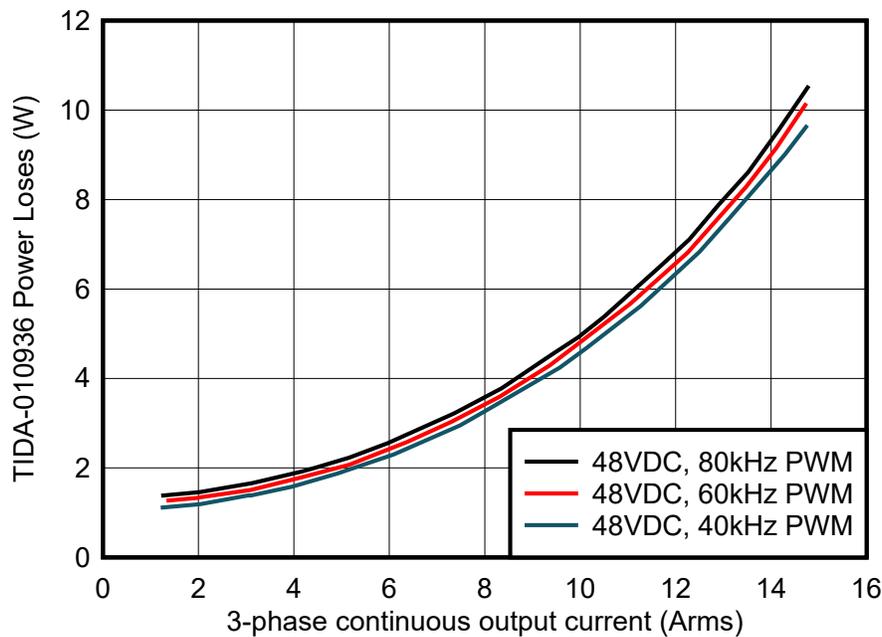


图 3. 48V 輸入與 3 相輸出電流的 TIDA-010936 電路板損耗

降低切換損耗

GaN 裝置的特性，讓 GaN 可實現如此低切換損耗。GaN 裝置的閘極電容 (C_g) 與輸出電容 (C_{oss}) 較小，可實現比 Si-MOSFET 快 100 倍的切換速度。由於關閉和開啟時間縮短，失效時間可控制在較短範圍內，例如 10-20ns，而 MOSFET 通常需要約 1us 的失效時間。減少失效時間可降低切換損耗。此外，GaN FET 沒有本體二極體，但飛輪功能可透過第三象限運作實現。在高頻率 PWM 情境中，MOSFET 的本體二極體會造成較大的反

向復原損耗 (Qrr 損耗)。第三象限運作也可避免本體二極體造成的切換節點振鈴和 EMI 風險，以減少對高功率密度人形機器人中其他裝置的干擾。

體積更小

人形機器人的接頭空間有限。電源板通常是直徑 5-10 cm 的環形 PCB。此外，接頭必須整合馬達、減速器、編碼器，甚至是感測器。至關重要的是，設計人員必須在有限空間內實現更高功率與更穩定的馬達控制。相較於 MOSFET，GaN 的 Rsp (特定電阻，面積與晶粒尺寸比較) 較小。也就是說，較同一 Rds(on) 的 MOSFET，GaN 的晶粒面積較小。德州儀器透過整合 FET 與閘極驅動器，進一步縮小佔地面積。如此可在僅 4.5 x 5.5mm 的封裝中實現 4.4mΩ 半橋 + 閘極驅動器。

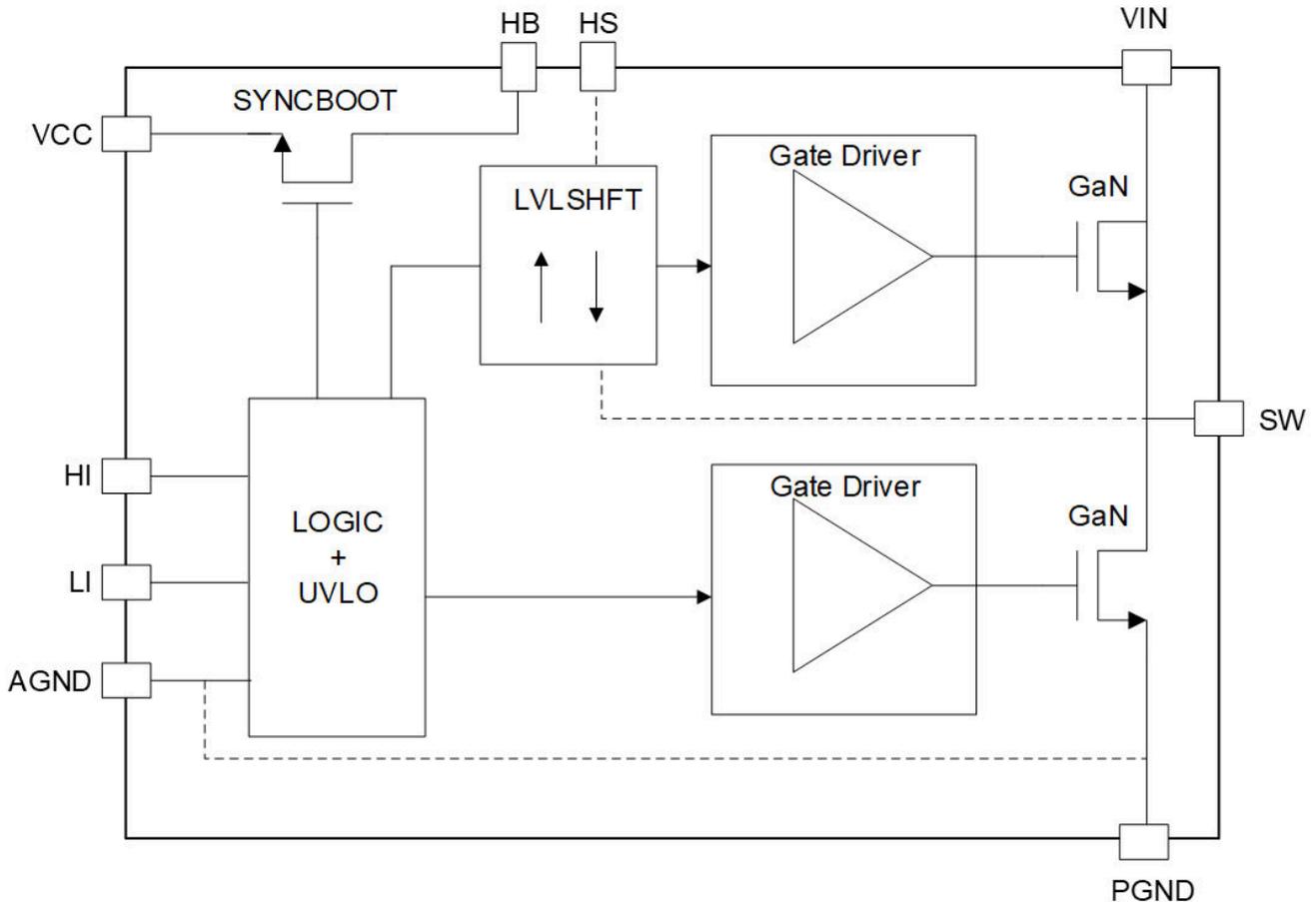


图 4. LMG2100 方塊圖

以 LMG2100R026 為例。此裝置整合半橋式與半橋式驅動器的 FET，可承受 55A 的連續電流。整合驅動器與 FET 有許多優點，其中包括：

- 減少閘極振鈴，實現更可靠的運作
- 以最佳化封裝體積減少電源迴路電感
- 可透過整合閘極驅動器來縮小尺寸
- 以整合式防護保護裝置

若要在設計中比較 GaN 與 MOSFET，我們可看到提供類似功率位準的 [TIDA-010936](#) 與 [TIDA-01629](#) 設計。如图 5 圖所示，由於整合式閘極驅動器與較低 GaN Rsp 的緣故，整體電源裝置的晶片面積減少超過 50%。

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](#) 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