



## 馬達驅動器

探索電子馬達控制的  
迷人世界

瀏覽 [ANALOG.COM/INTELLIGENT-MOTION](https://www.analog.com/intelligent-motion)



## 前言

**作者：ADI工業自動化智慧型機器與機器人系統應用總監DARA O'SULLIVAN**

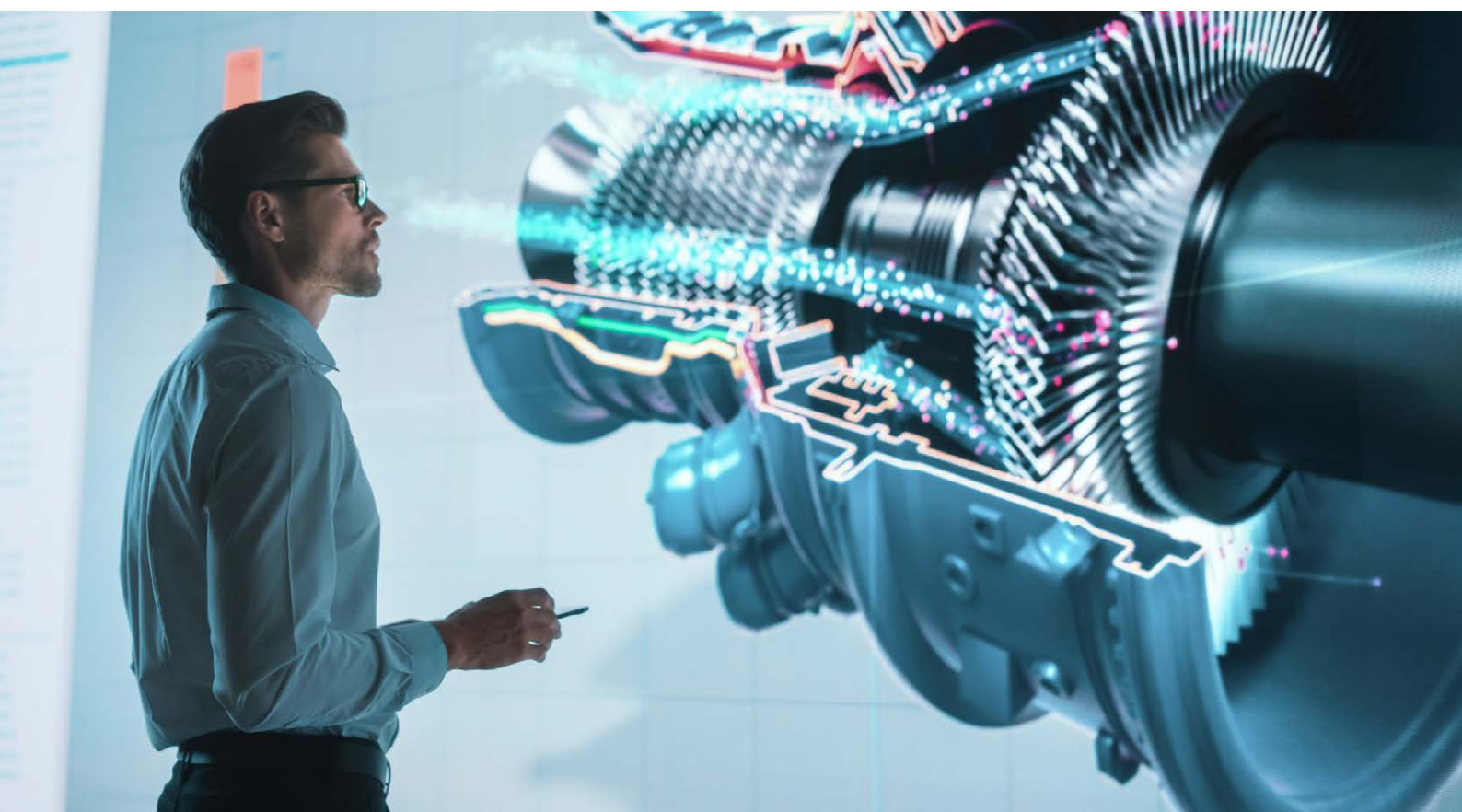
工業應用消耗了全球總用電量的30%，而馬達能耗則約佔了工業用電量的70%。馬達廣泛用於各種工業應用，以驅動泵、風扇、壓縮空氣系統、物料搬運、加工系統等。據估計，如果所有已部署的馬達驅動系統都以最高能效運行，那麼到2030年時，全球電力需求將減少10%，碳排放量也將減少24.9億噸。

智慧運動控制融合了精準回饋、先進感測、高性能控制和無縫連接技術，可提供確定性運動解決方案，實現高度彈性且高效的製程。工業應用運動控制解決方案已從基本的開/關定速馬達發展到複雜的多軸伺服驅動解決方案。這種轉變是為了適應自動化技術日益複雜的趨勢，以滿足在智慧製造中提供更高水準的性能和自主性的需求。

本電子書系統性地方式介紹了馬達驅動技術。內容以概述工業自動化趨勢對運動控制發展的推動作用作為起始，然後深入講解馬達控制架構，探索具體的組成要素，包括輸入級、電源、逆變器級、主控制器、回饋迴路和連接等考慮因素。

## 目錄

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 透過提升馬達性能保護地球環境               | 4  |
| 因應第四次工業革命的馬達控制               | 8  |
| 變速驅動器基本原理                    | 12 |
| 插入電源：變速驅動器的交流輸入級             | 14 |
| 為驅動器供電——不僅是插入電源如此簡單          | 18 |
| 逆變器級：釋放電力電子的力量               | 24 |
| 運用電流感測增強馬達控制                 | 28 |
| 如何看待位置感測？                    | 32 |
| 強勁動力背後的「大腦」：現代馬達驅動器中的控制器和處理器 | 36 |
| 建立正確的連接與馬達驅動器應用進行通訊          | 40 |
| 為驅動器的未來提供安全保障                | 44 |



# 透過提升馬達性能保護地球環境

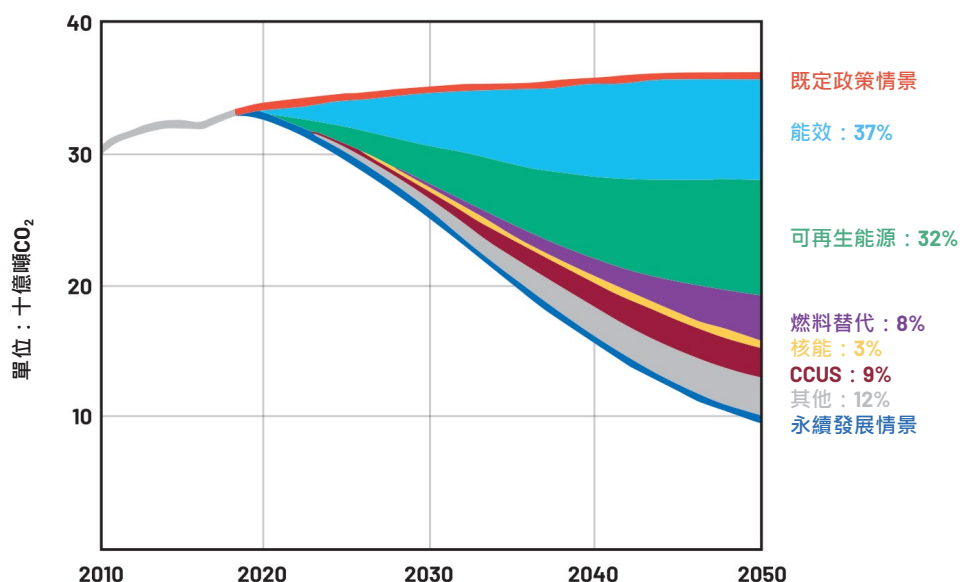
接下來的章節將從多個不同角度探討馬達驅動器，從架構到電源管理、以及從連接到網路安全等。文章首先將從宏觀的視角切入，而第一章便將探討提高馬達能效如何有助於減少有害氣體的排放，延緩氣候變遷。

2015年的《巴黎協定》要求將全球變暖限制在1.5°C以內。欲實現2050年1.5°C的控溫目標，CO<sub>2</sub>排放量必須比2018年減少約70%。目前的全球暖化趨勢有可能引發嚴重的經濟、社會和環境危機。全球目前已經升溫1.1°C，專家則預測2030年時，增幅可能會突破1.5°C。

全球已經升溫1.1°C，  
專家預測2030年增幅  
可能會突破1.5°C。

圖1顯示了將CO<sub>2</sub>排放量減少至100億噸以下實現1.5°C控溫目標的途徑，內容可詳見《2019年全球能源展望》<sup>[1]</sup>。在該報告中，國際能源署(IEA)研究了全球排放趨勢的兩種情景。第一種是既定政策情景，主要是根據公開宣佈的政府政策來估算排放量。第二種是永續發展情景，內容探討減少排放的其他途徑。在IEA的永續發展情景中，減少CO<sub>2</sub>排放的可能突破口是提高能效，相較於既定政策情景，其佔了永續發展情景減排量的37%。2022年時，工業CO<sub>2</sub>排放量佔總排放量的25%<sup>[2]</sup>，加速工業能效投資將是實現2050年淨零排放目標的重要舉措之一。

圖1：減少CO<sub>2</sub>排放的途徑<sup>[1]</sup>



## 工業馬達為何如此重要

2022年全球電力供應量為28,642太瓦時 ( TWh )，產生的碳排放量達132億噸<sup>[3]</sup>。據估計，工業消耗了全球總用電量的30%，而馬達能耗約佔工業用電量的70%<sup>[1]</sup>。很明顯的，馬達的能效對於圖1所示的節能減排具有非常重要的作用。最基礎、最低效的運動解決方案基於直接交流並網三相馬達，使用開關設備來提供開關控制和基本保護。此類運動控制解決方案以相對固定的速度運行，不受負載變化影響。節流閥、阻尼器、閥門等機械控制裝置可調整輸出變數（例如泵和風扇中的流體流量），而齒輪則可實現顯著的速度變化。

### 部署永續運動解決方案可將全球能源消耗量減少10%

4.5億台  
已安裝馬達

0.52億台/年  
新安裝馬達

30%  
工業能耗佔  
總能耗的比例

96%  
馬達能耗佔  
工業能耗的比例

圖2：工業馬達能耗在全球總能耗中的佔比

如圖3(b)所示，增加整流器、直流母線和三相逆變器級會得到可變頻率和可變電壓輸出的逆變器，當應用於馬達時可實現變速控制。這種由逆變器驅動的馬達可以使馬達在負載和應用中以優化的速度運行，進而大幅降低系統能耗，應用實例包括高能效的泵和風扇。將逆變器增加到泵、風扇或壓縮機的現有馬達時，功耗可以降低25%至60%，具體取決於馬達和應用<sup>[4,5]</sup>。對於更高性能的運動控制應用而言，變速驅動器(VSD)可以助力實現精準的扭矩、速度和位置控制，如圖3(c)所示。

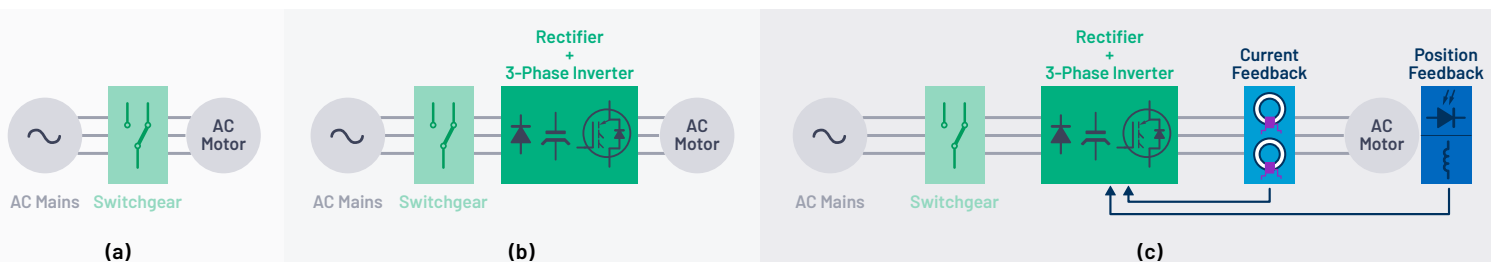


圖3：(a)並網交流馬達，(b)逆變器驅動的馬達，(c)變速馬達驅動器

據估計，工業領域部署的所有馬達中，只有大約1/6是由逆變器驅動或連接到VSD<sup>[6]</sup>。透過將更多已部署的運動設備從並網馬達改為使用逆變器或VSD，可以顯著降低能耗和CO<sub>2</sub>排放量。能耗降低可以促進永續製造，同時減少CO<sub>2</sub>排放。據估計，如果所有已部署的馬達驅動系統都以最高能效運行，那麼到2030年時，全球電力需求將減少10%，CO<sub>2</sub>排放量將可減少24.9億噸<sup>[7]</sup>。

## 馬達能效標準

為加速部署更高效的馬達驅動系統，國際電工委員會(IEC)推動制定了節能馬達標準，包括IEC 60034-2-1馬達測試標準和涵蓋四級馬達能效 (IE1到IE4) 的IEC 60034-30-1分類方案 (未來還將導入IE5級別)。要達到更高級別的標準，可以採用更高效的馬達設計，或在標準馬達設計中加入逆變器或VSD。隨著能效標準日益提高，僅透過改進馬達設計來滿足這些要求越來越困難，成本也逐漸攀升。有鑑於變速控制為應用帶來的額外優勢，目前已有越來越多的工業馬達傾向於加裝VSD。

[下一章](#)將重點介紹工業自動化領域除能效之外的其他趨勢，這些都是推動運動控制從簡單的並網機器朝向高度可控多軸VSD系統發展之趨勢。

## 參考資料

[1] 《2019年世界能源展望》，國際能源署，2019年。

[2] [《2022年世界能源展望》](#)，國際能源署。

[3] 《2023年電力市場報告》，國際能源署，2023年2月。

[4] [“Achieving the Paris Agreement: The vital role of high-efficiency motors and drives in reducing energy consumption”](#)，ABB，2021年。

[5] [“Applications of variable speed drive \(VSD\) in electrical motors energy savings”](#)，R. Saidur · S. Mekhilef · M.B.Ali · A. Safari · H.A.Mohammed，Renewable and Sustainable Energy Reviews，2012年1月。

[6] [“U.S. Industrial and Commercial Motor System Market Assessment Report · Volume 1”](#)，Lawrence Berkeley National Laboratory，2021年1月。

[7] [“Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems”](#)，國際能源署，2011年。



2022年全球  
電力供應量為  
**28,642**太瓦時，  
產生的碳排放量  
達132億噸。

# 因應第四次工業革命的馬達控制

本章將介紹馬達控制架構和功能如何演變以滿足工業4.0的要求：從簡單的並網馬達到複雜的多軸伺服驅動解決方案。

消費端、供應鏈和智慧製造的快速數位化趨勢，對於更高的生產效率、靈活度和自主性帶來更高的要求，這使得自動化技術日益複雜，因而也導致馬達控制的演變不斷加速<sup>[1]</sup>。對敏捷生產和大量存取生產資料的需求，也進一步共同推動了馬達控制系統複雜性的增加。

## 敏捷生產

對敏捷生產和大量存取生產資料的需求，共同推動了馬達控制系統複雜性的增加。

隨著產業不斷根據消費者需求和不斷改變的購買者行為做出調整，需要透過基於可重新配置生產線的敏捷生產來提供更多客製化，實現更快的周轉時間。消費者需求正在推動從低組合、大量製造朝向高組合、少量製造的轉變，而這就需要生產廠房具有更高的彈性。複雜、重複且通常較危險的任務，現在已可由工業機器人和協作機器人完成以實現更高的產出和生產力。生產模式的轉變，則導致對更複雜、可客製、自主化、智慧自動化硬體的需求提高，而其核心，正是馬達控制系統。例如，輸送帶和搬運機等系統需要變得更加智慧，具有更多的運動軸，並且高度可配置。



## 存取生產資料

變速驅動器能夠提供電壓、電流、位置、溫度、功率、能耗等機器資料，並結合外部感測器來監測振動和其他過程變數。借助融合了資訊科技/操作技術 (IT/OT) 的乙太網路，馬達和機器資料及相關洞察現在更加易於存取，並且可由強大的雲端運算和人工智慧(AI)進行分析，以優化製造流程並監測整個裝置中資產的目前健康狀況。製造流程的優化將有助於進一步降低智慧製造的能源消耗。

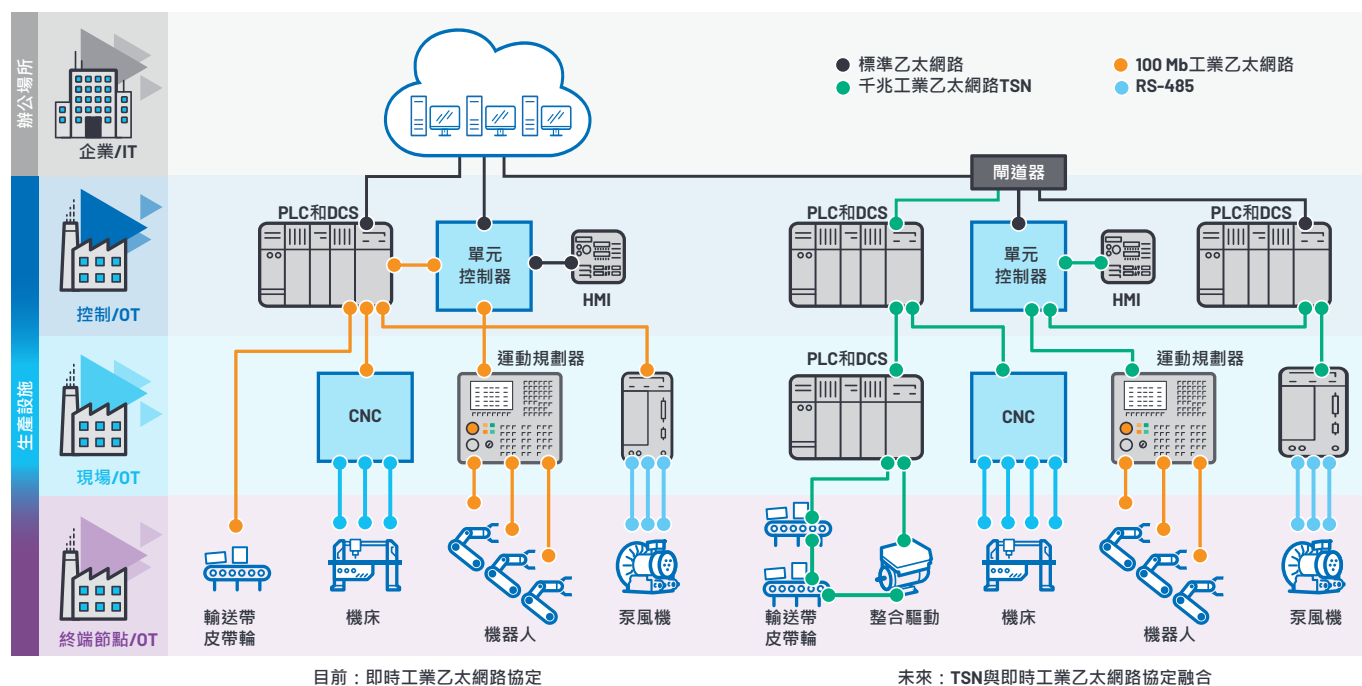


圖1：無縫工業乙太網路連接促進實現數位轉型

為實現此一目標，運動控制系統正在轉向融合連接方式，傳統的混雜式工業乙太網路通訊協定正逐漸被基於時間敏感網路(TSN)的系統所取代。TSN系統遵循IEEE802.1網路標準<sup>[3]</sup>，如圖1所示。這將確保整個網路的所有區域都能即時獲取終端設備產生的時間同步資料。

## 馬達控制解決方案概覽

最終，現代生產系統會混合使用簡單和複雜的馬達控制系統，如圖2所示。其中，連接並網驅動器和簡單的逆變器驅動器將逐漸被互連式、整合感測器的同步系統所取代。以下簡要說明每種馬達控制的特點及其應用。

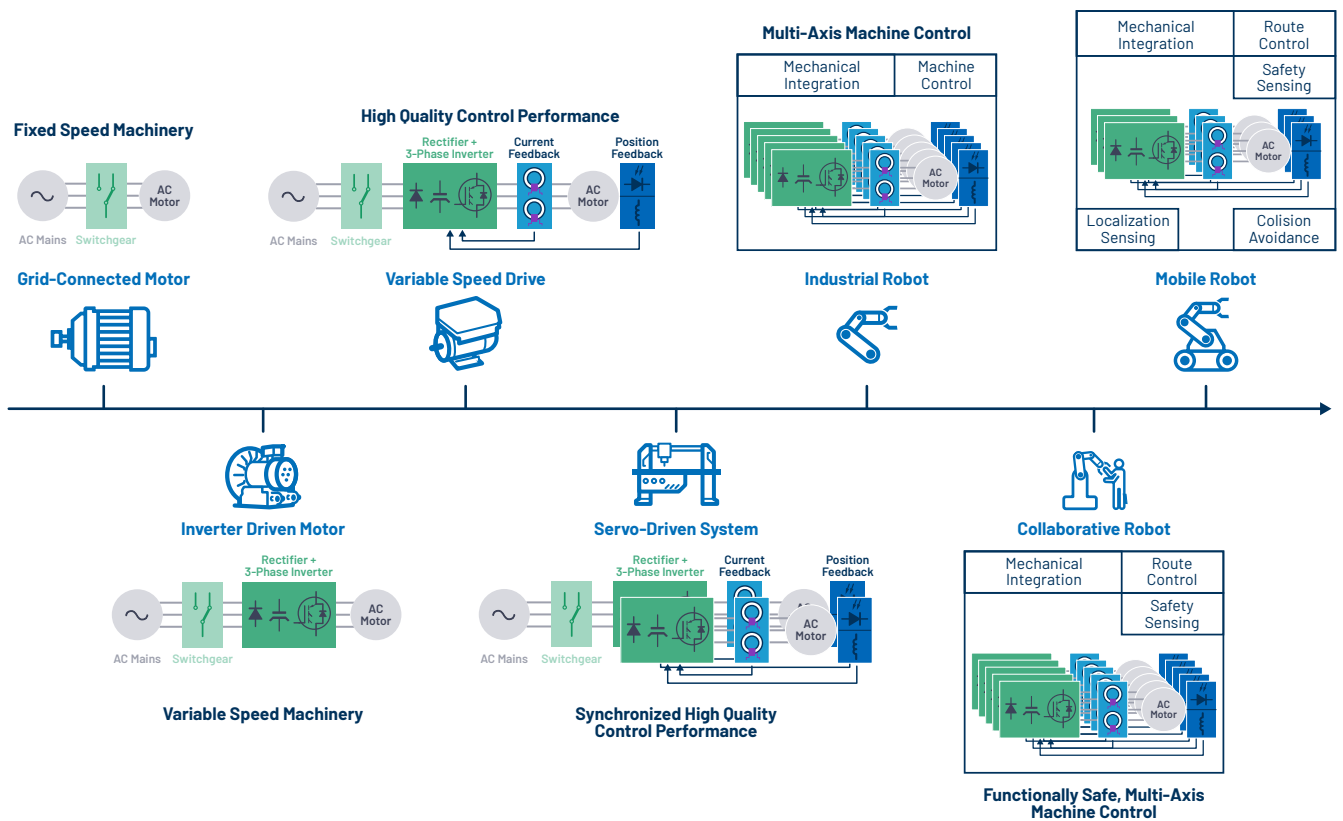


圖2：現代自動化領域使用的各種馬達控制解決方案

**並網馬達：**此類基本的運動控制解決方案以相對固定的速度運行。真正的恆速應用在工業中並不多見。然而，在馬達僅偶爾運作且使用VSD又不划算的情況下，諸如低功耗、間歇使用的鼓風機、水泵、閥門和執行器等仍會使用這種馬達。

**逆變器驅動馬達：**為馬達控制增加一個簡單的開迴路逆變器，可以使馬達在負載和應用中以優化的速度運作，進而大幅降低能耗。典型的應用包括泵、風扇、鼓風機和比較簡單的控制系統（如平台移動器）。

**變速驅動器：**對於更高性能的運動控制應用，變速驅動器(VSD)可以促進實現精準的扭矩、速度和位置控制。為了實現上述控制，我們在基本的開迴路逆變器驅動器中增加了電流和位置測量。需要VSD的典型應用包括輸送帶、捲繞、印刷和擠壓機械。

**伺服驅動系統：**同步多軸伺服驅動系統用於更複雜的運動應用中。機床和數控機床要求多軸同步操作，因此需要極為準確的位置回饋。精密加工和增材製造是利用多軸伺服驅動器的主要應用。

**工業機器人/協作機器人/移動機器人：**工業機器人需要將多軸伺服驅動、機械整合和先進的機器控制演算法組合使用，以實現複雜的3D空間定位。協作機器人基於工業機器人解決方案建構，但增加了功率和力限制(PFL)及安全感測，以提供功能安全的多軸機器控制，使得操作人員能夠在協作機器人旁安全工作。行動機器人增加了定位檢測和防撞功能。機器人系統的應用領域正不斷擴大，已從傳統的汽車製造，延伸到搬運、疊棧、取放、包裝和物流。

在下一章中，我們將開始探討馬達驅動器本身的架構，並拆解為若干子系統和元件進行介紹。

## 參考資料

[1] [“The Fourth Industrial Revolution: what it means and how to respond” | 世界經濟論壇 \(weforum.org\)](#)

[2] Shawn Fitzgerald、Daniel-Zoe Jimenez、Serge Findling、Yukiharu Yorifuji、Megha Kumar、Lianfeng Wu、Giulia Carosella、Sandra Ng、Robert Parker、Philip Carter、Meredith Whalen，*“IDC FutureScape: Worldwide Digital Transformation 2021 Predictions”*，IDC，2020年10月。

[3] <https://1.ieee802.org/>



# 變速驅動器基本原理

本章重點介紹變速驅動器的基本工作原理。在輸送帶、捲繞、印刷、擠壓機械和許多其他工業應用中，變速驅動器是實現精準馬達控制的關鍵元件。據估計，工業領域部署的所有馬達中，只有20%到30%是由逆變器驅動或連接到變速驅動器。如果每台馬達都以盡可能高效的方式驅動，即匹配適當的負載並採用合適的馬達驅動器，則全球能源使用量可望減少高達10%。

變速驅動器(VSD)有助於優化能源消耗，提高生產力，延長設備壽命，提升馬達驅動系統的整體能效。

變速驅動器(VSD)將固定頻率和電壓的輸入轉換為可變頻率和電壓的輸出，進而實現對馬達速度和扭矩的精準控制。其有助於優化能源消耗，提高生產力，延長設備壽命，提升馬達驅動系統的整體能效。馬達驅動器主要位於交流電網和馬達之間。其從交流電網獲取主電源，並利用整流器和電容濾波器，將交流電源電壓轉換為直流電壓。濾波電容組有助於減少直流母線上的交流漣波。直流電壓經平滑處理後，被施加到逆變器級。

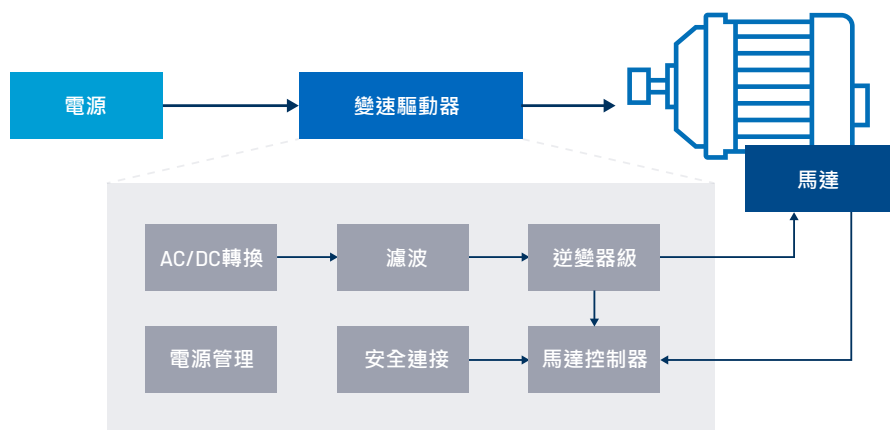


圖1：框圖

逆變器級是變速驅動器中最重要的部分，其負責將直流輸入轉換為變頻輸出，並由功率電晶體、隔離式閘極驅動器、電壓和電流回饋電路以及其他保護和監控電路組成。功率電晶體將高壓直流母線轉換為變頻、變壓三相交流輸出供馬達使用。在逆變器級，閘極驅動器利用馬達控制器產生的脈寬調變(PWM)訊號來導通和關斷功率電晶體，進而根據馬達負載來改變馬達所需的交流輸出（電壓和頻率）。閘極驅動器能夠高效地導通和關斷功率電晶體，調節輸出電壓和頻率，同時保護其免受故障影響。

電壓和電流感測電路對於馬達控制非常重要，主要負責測量馬達中的電流和電壓，並將測量的值回饋回電流控制迴路。馬達電流與馬達扭矩直接相關，而電流控制迴路的頻寬則決定了變速系統的整體扭矩回應。為確保每安培電流產生最大扭矩並優化馬達能效，需要採取精準且穩健的測量方法，同時這還有助於節省電能，增強永續性。

逆變器直接連接到馬達本身。在許多系統中，馬達都會安裝一個編碼器裝置，主要是用於測量馬達轉子的位置，並將位置資訊回饋給馬達控制器。馬達控制器是處理單元，其從編碼器、逆變器和任何外部介面獲取輸入，並將輸出優化的脈寬調變訊號傳回逆變器，以使馬達高效運行。處理器的選擇取決於應用和算力需求，可以是微控制器、FPGA、高性能微處理器，或這些元件的某種組合。安全連接模組是使用者和網路介面與馬達驅動器交流的地方。連接和安全正成為馬達驅動器與外界進行通訊的關鍵要素。為使馬達驅動器能夠在惡劣的高雜訊環境中可靠運行，必須設計為具有增強抗擾度和穩固性的連接解決方案。隨著連接需求的日益成長，元件層面的安全性能需求隨之增加。製造商必須保護生產資產免受惡意軟體和不可信指令的攻擊，確保安全啟動和可信執行，保障網路通訊的安全性。



## 插入電源：變速驅動器的交流輸入級

上一章簡要說明了組成變速驅動器(VSD)的不同要素。以下的圖1詳細展示了VSD的功能框圖，包括驅動器的不同部分，與馬達、編碼器和外部網路的各種外部介面，以及不同元件之間的電力傳輸和資料流程。

每種驅動架構略有不同，特別是在如何管理高壓區域和安全超低壓(SELV)區域之間的電氣隔離方面，但圖1所示的架構相當常見。

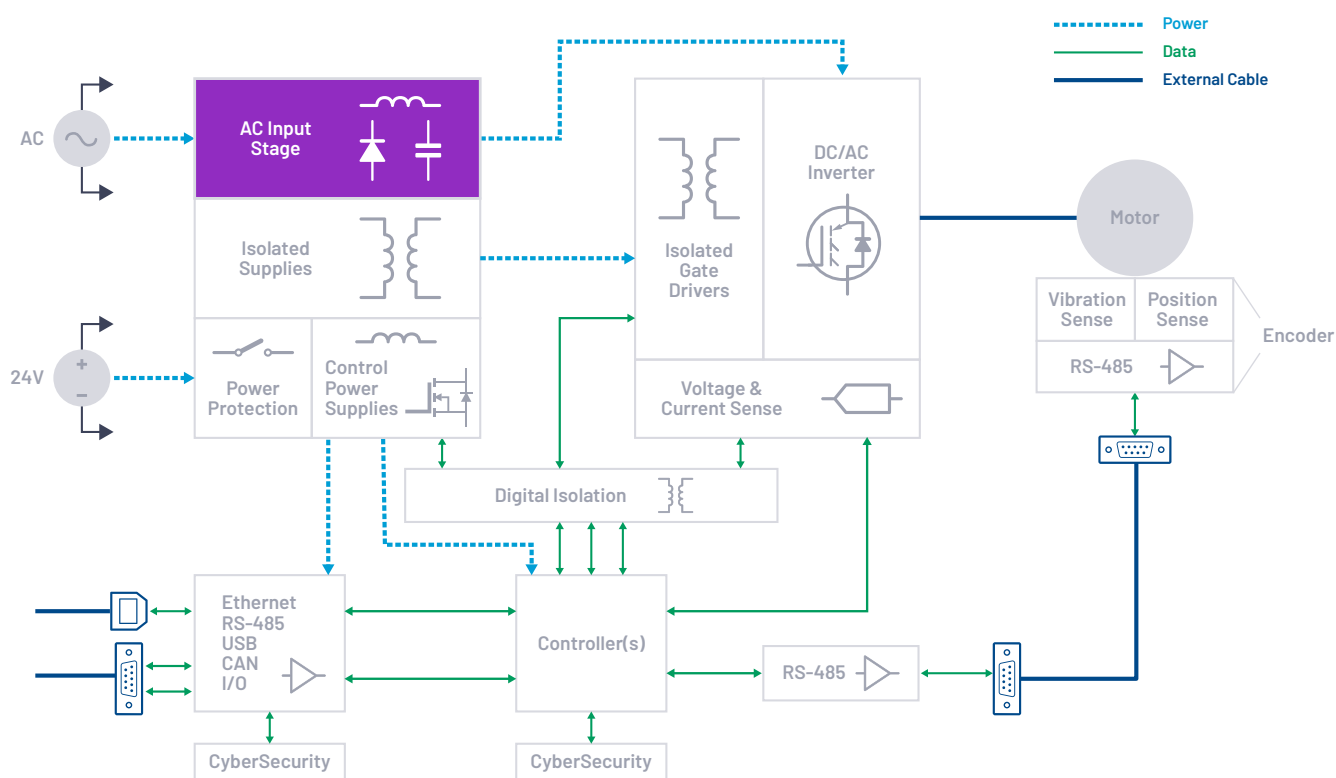


圖1：變速驅動器的詳細架構

本章將深入探討交流輸入級模組。如圖1所示，交流輸入級是從交流電網電源到DC/AC逆變器級的主電源路徑。本章將討論此模組承擔的不同功能，包括：

- ▶ AC/DC轉換
- ▶ EMI濾波
- ▶ 湧浪保護
- ▶ 瞬變保護

## 交流輸入級是從交流電網電源到DC/AC逆變器級的主電源路徑。

### AC/DC轉換

整流器的主要作用是將交流輸入（單相或三相）轉換為直流母線電源，作為DC/AC逆變器級的輸入。這一般是透過六二極體橋式整流器實現的，隨後在直流母線上連接一個大型電解電容組。該電容組對整流後的交流訊號進行平滑處理，使其更接近直流，實質上產生大型低通濾波器的作用。直流母線上存在的「漣波」量與直流母線電容組的大小成正比。同時，為了確保驅動器在交流電源短暫斷電時還能繼續工作，也必須合理選擇該電容組的大小，以提供足夠的電力維持時間。有些變速驅動器採用完全受控的AC/DC轉換器，使用功率開關而非功率二極體。透過功率開關，可以完全控制輸入交流電流，以便管理低頻諧波。然而，這些元件相對更昂貴，在大多數應用中也並不需要。

### EMI濾波

AC/DC整流器級也很重要，其有助於確保驅動器符合傳導EMI規定，例如國際電工委員會(IEC)發佈的EN61000-3-2。DC/AC逆變器是一種開關轉換器，會產生許多快速瞬態電壓和電流，這些電壓和電流會透過寄生電感和電容產生顯著的差分和共模高頻電流，必須防止這些電流污染交流網路和影響其他設備。為了對輸入EMI進行濾波，通常會混合使用差模和共模扼流圈，並在交流線路之間及交流線路與接地之間混合使用高頻旁路電容（分別稱為X電容和Y電容）。這些元件對高頻電流表現出高串聯阻抗，而對接地則表現出低阻抗，因而能夠將高頻電流導入地線。

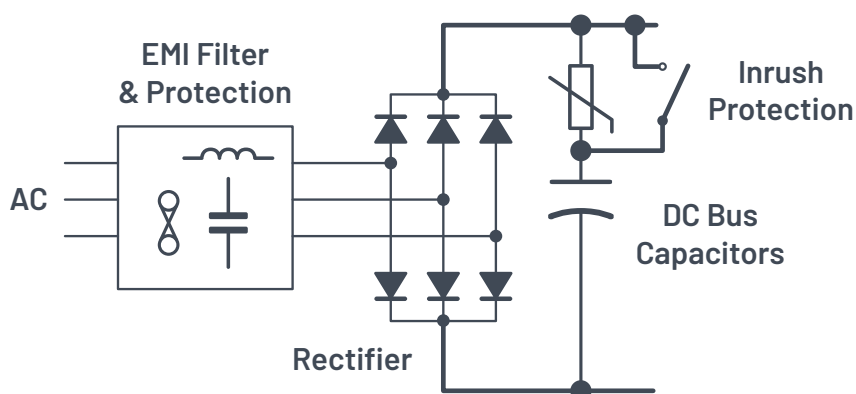


圖2：輸入級電路

### 湧浪保護

湧浪保護是輸入AC/DC級承擔的另一項重要功能。啟動時，直流母線電容組完全放電，從交流線電壓到直流母線的充電電流僅受EMI濾波器扼流圈和橋式二極體的阻性阻抗限制。

如果沒有額外的限流措施，非常高的瞬態充電電流將從交流線流向直流母線電容組，這可能導致濾波器元件和/或整流二極體超載。為了解決此一問題，有時會在充電路徑中插入一個串聯熱敏電阻。當溫度較低時，熱敏電阻的阻值較高，進而將充電電流限制在合理水準。溫度上升後，阻值就會急劇減小，進而降低功率損耗。此種形式的湧浪保護存在一個問題，如果設備在短時間內多次重啟，熱敏電阻可能沒有足夠的時間冷卻，導致破壞性的過電流出現。更好的解決方案是使用標準限流電阻，並且並聯一個繼電器或固態開關，一旦湧浪週期結束，開關隨即導通，如圖2所示。

## 瞬變保護

最後值得一提的是，瞬態電壓保護是輸入AC/DC級承擔的一項關鍵功能。由於各種原因，交流電網中可能會出現瞬態電壓尖峰和湧浪，這些情況可能會對馬達驅動器造成永久性損壞。為了解決此一問題，通常將瞬態電壓抑制器(TVS)二極體或金屬氧化物壓敏電阻(MOV)等元件與交流線各相並聯。這些元件的作用是箝制電壓尖峰並吸收與之相關的能量，進而保護其餘電子設備。

圖3顯示了Rockwell馬達驅動器內部的交流輸入級的各種元件。儘管從電子角度來看，這些元件相對簡單，但它們佔據了馬達驅動器內很大的空間，並且對驅動器的整體可靠性、保護功能和壽命有很大影響。

圖3：變速驅動器中的交流輸入級元件

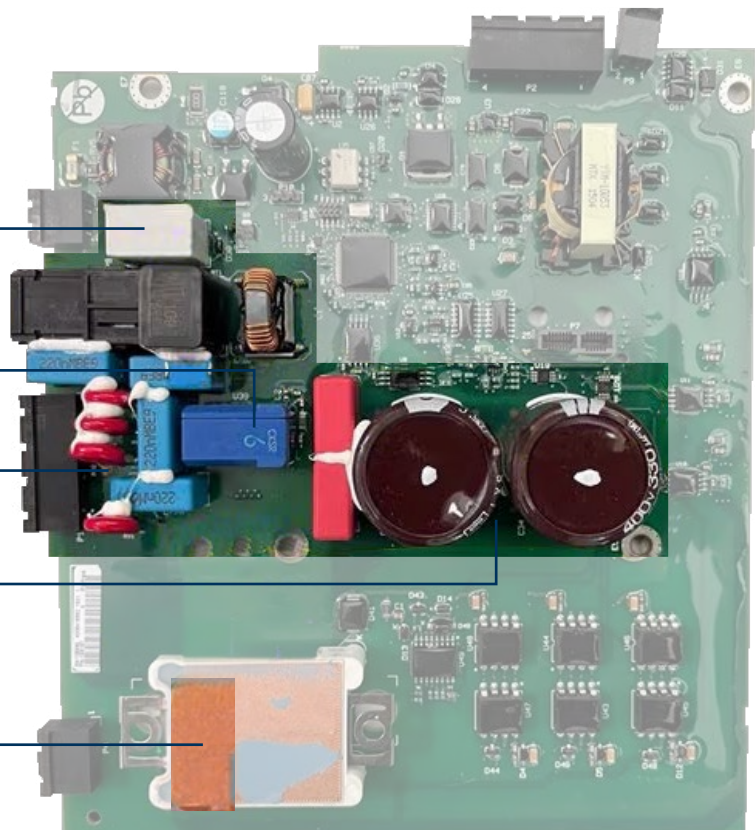
湧浪保護

EMI濾波器

瞬變保護

直流母線電容

二極體整流器



據估計，工業領域  
部署的所有馬達中，  
只有**20-30%**  
是由逆變器驅動或  
連接到變速驅動器。



# 為驅動器供電——不僅是插入電源如此簡單

上一章討論了馬達驅動器的交流輸入級。其主要是一個AC-DC電源轉換級，將交流輸入電源轉換為直流電源，為主要三相逆變器提供輸入。除了高壓逆變器電源域之外，驅動器還需要幾個其他電源域。對於變速驅動器設計人員而言，管理電源域，提供適當的接地參考和隔離，保護電源域免受外部瞬變影響是一項關鍵任務。

本章探討變速驅動器中的電源管理，並研究不同電源域中存在的一些要求。在上一章中，我們介紹了一個典型架構的示意圖，以下的圖1再次展示了該示意圖。本章探討的驅動器部分以重點顯示。

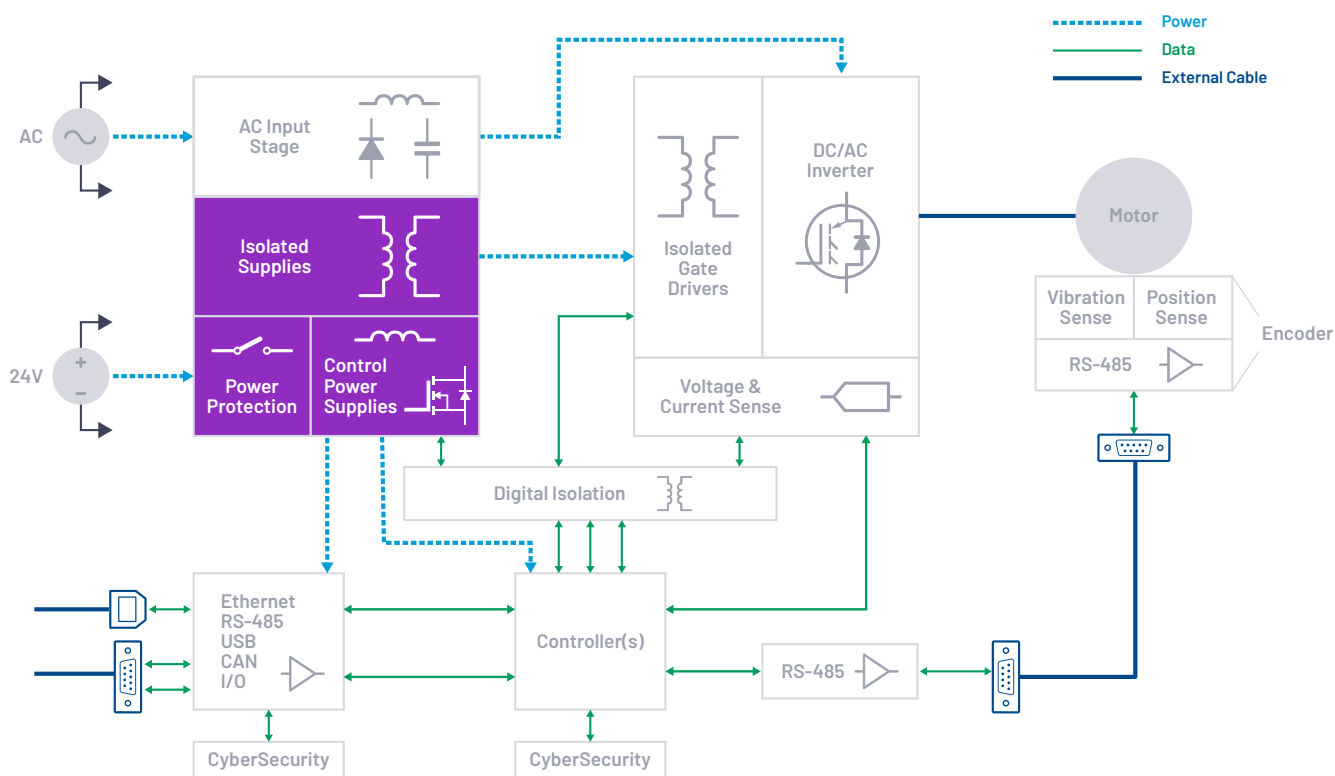


圖1：變速驅動器的詳細架構

首先，我們來識別變速驅動器內的主要電源。它們分別是：

- ▶ 主控電源
- ▶ 逆變器隔離電源  
( 閘極驅動器和馬達相電流感測 )
- ▶ 多個低壓控制電源軌

管理電源域，並保護其免受外部瞬變影響是變速驅動器設計人員的關鍵任務。

每個電源都有各自特有的功能，並存在特定的要求。

## 主控電源

主控電源通常是24V直流母線（有時也可以是12V母線）。主控電源有多種功能。其充當中間直流電壓源，為低壓軌分配所需的電壓，同時其還可用於直接為驅動器外殼內可能需要的散熱風扇供電，或為其他更高電壓負載（如馬達制動器）供電，如圖2所示。

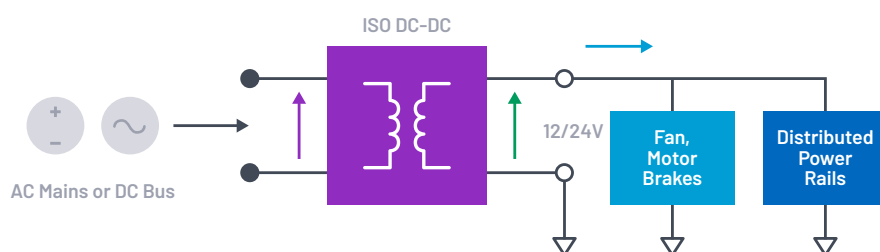


圖2：主控電源

這主要是透過隔離式DC-DC轉換器從主高壓直流母線獲得的。在某些情況下，可以直接從其中一個交流輸入相位獲得。無論何種情況，常見的電源拓撲選擇都是反馳式轉換器。但是，反馳式轉換器並非最理想的電源轉換器！其雜訊相當大，並且難以嚴格控制輸出電壓。然而，其同時具有一些不容小覷的重要優勢：結構簡單（單一電晶體、單一磁性元件）、成本低。對於變速驅動器而言，成本是決定產品競爭力的重要因素，而且變速驅動器本身就是高噪音源，因此反馳式轉換器的優點足以蓋過其缺點。圖3顯示了ADI的解決方案示例，這種解決方案的優點是能夠良好地控制輸出電壓，無需透過光耦合器來向控制器提供輸出電壓回饋，也就是“無光耦反馳式轉換器”。在更高功率的變速驅動器中，反馳式轉換器可能不合適，因此通常選擇半橋或全橋隔離拓撲（如LLC轉換器）。

## 逆變器隔離電源

閘極驅動器負責控制逆變器功率開關，每個閘極驅動器單元都需要隔離電源。通常需要三個12-20V電源軌（有時也具有負電源軌，以三個馬達相開關節點為基準）和一個低端電源（以直流母線負電源軌為基準）。這些電源的“接地”並未與安全接地相連，甚至沒有與低雜訊的接地參考相連，並且對於閘極驅動器電源而言，電壓會迅速超過數百V，因此需要隔離。總體而言，這通常相當於四個隔離式DC-DC轉換器，一般是從中間直流母線轉換為閘極驅動器電源。

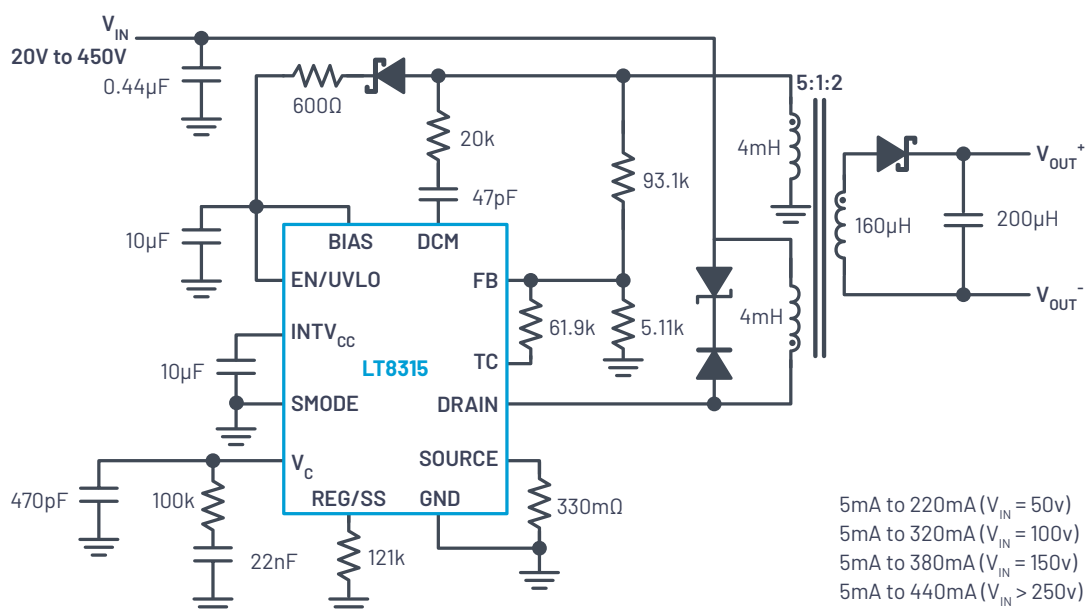


圖3：無光耦反馳式轉換器示例

這些隔離電壓軌用於為VSD中使用的功率電晶體（功率MOSFET、IGBT或SiC/GaN元件）提供開關電壓。馬達各相中連接的電流感測器通常也需要隔離電源電壓，這些電壓通常直接來自開極驅動器電源透過LDO（低壓差）穩壓器獲得，如圖4所示。

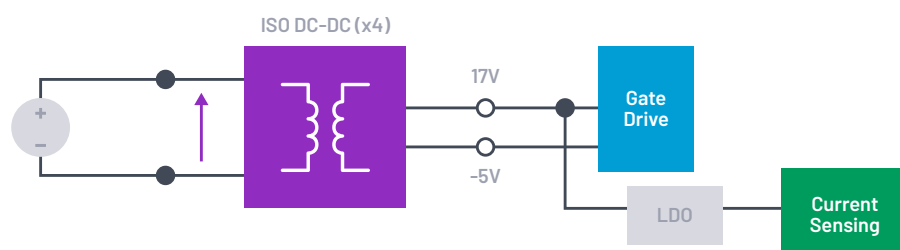


圖4：逆變器隔離電源

同樣的，對於這些電源，多輸出反馳式轉換器仍是可行的解決方案，不過由於需要多組輸出，其變壓器設計往往相當複雜，而且體積龐大。

## 控制電源保護

在VSD中，保護主控電源（通常為24V）免受瞬變和異常情況的影響極為重要。原因在於該電源軌通常有兩條路徑。第一條路徑如前所述，其中24V控制電源來自交流主電源，或透過隔離式電源轉換級從高壓直流母線獲得。但是，該24V電源軌通常也可以直接由連接到VSD的輔助電源輸入供電。

大多數自動化環境會在控制櫃周圍分配24V電源，以服務於一系列控制設備，VSD通常會利用此電源。這個輔助24V輸入通常與轉換器產生的24V電源形成二極體「或閘」連接，以確保每次只有一個電源處於活動狀態。這種方案的優勢在於，即使交流電源斷電或跳閘，輔助24V電源通常仍會繼續運行，因此VSD的控制電子元件可以保持通電，進而能夠快速重新啟動VSD，並且不會丟失任何上下文資訊。缺點在於，VSD電源將因此受到整個工廠內24V供電系統上存在的所有電壓瞬變的影響。造成這些瞬變的原因很多，例如：負載切換激發配電電纜產生電壓振鈴，雷電事件在系統中傳播，附近電場或人體接觸產生靜電放電，電纜拾取電磁干擾，等等。因此，必須為這個輔助電源輸入提供可靠的保護。

VSD功能安全標準IEC 61800-5-2附件A ( 第B.3.2節 ) 展示了針對此類24V直流電源軌的推薦電源(PS)和電壓監控器(VM)子系統。其中包括針對各種常見故障的保護，例如極性接反、過流和電壓瞬變。

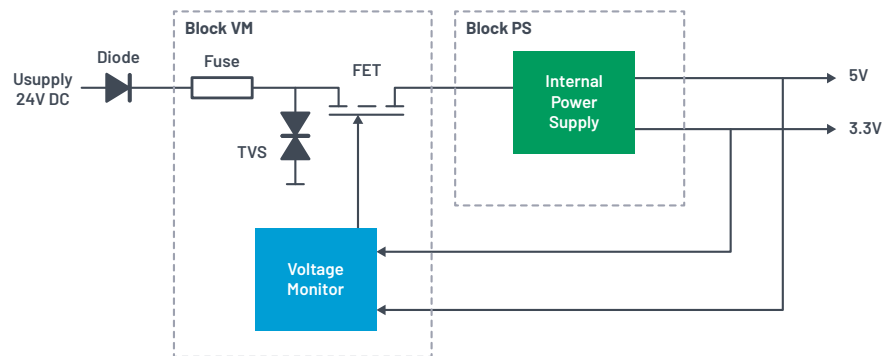
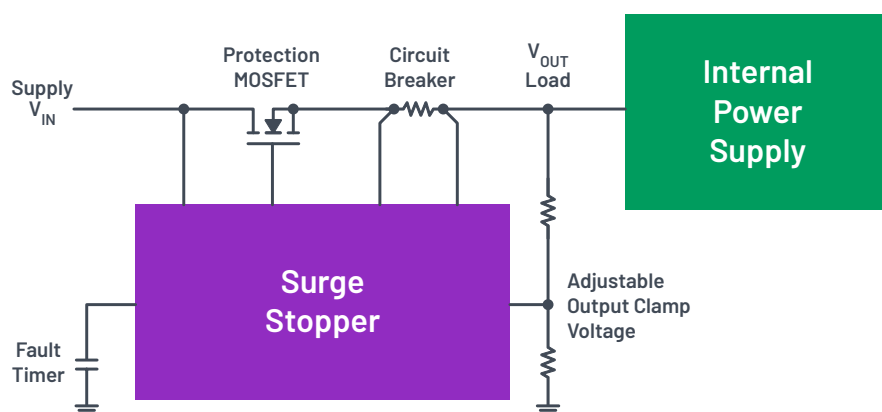


圖5：IEC 61800-5-2推薦的輔助電源保護

由於各種瞬變的能量水準和持續時間可能不同，設計分立電路可能非常耗時且容易出錯，長期可靠性也可能很差。ADI湧浪抑制器系列等整合解決方案整合了IEC 61800要求的所有保護功能，包括輸入極性接反檢測和保護、過流/短路/湧浪電流感測和保護以及高壓瞬變斷開。

圖6展示了如何利用ADI的湧浪抑制器來實現IEC61800-5-2中所述的保護建議。LT4363或整合式MOSFET變體LTC4381等元件可以為主控電源提供穩健可靠的保護解決方案。

圖6：符合IEC 61800-5-2標準的  
ADI湧浪抑制器實現方案



## 低壓負載點(POL)電源

主控電源的下游是低壓(<12V)電源軌。這些基本上是負載點(POL)電源，直接為主控制器 (CPU、FPGA)、其他數位元件 (記憶體、收發器、介面)、類比電路 (ADC、DAC、運算放大器等) 以及I/O元件和終端供電。這些電源架構的具體設計對於每個VSD而言都不一樣，很難一概而論，但圖7和圖8展示了實現這些電源的典型方法。在圖7中，一些關鍵低壓軌採用單級開關穩壓器；針對雜訊敏感的類比軌或電壓較低的超低電流軌，則增加了後端低壓差 (LDO)穩壓器。

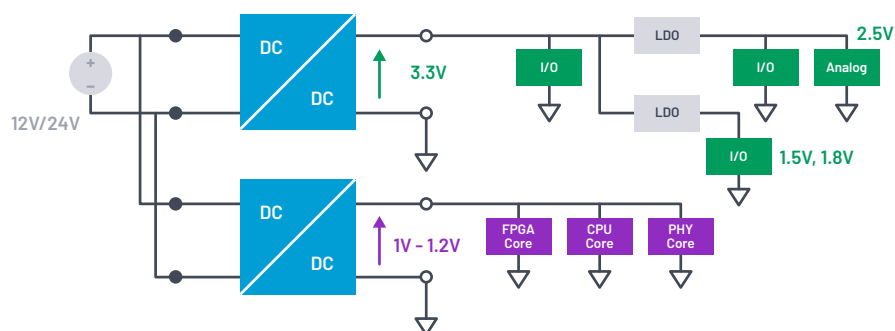
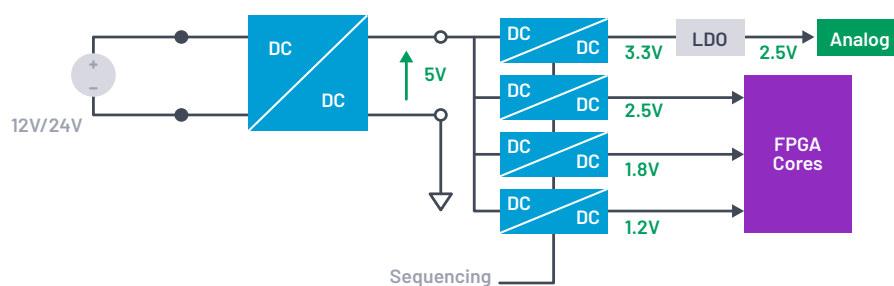


圖7：單級開關穩壓器方法

在圖8中，首先生成單個中間軌 (本例中為5V)，然後根據POL元件的需要，進一步降壓到各電源軌。其中還顯示了可能需要控制啟動時序或追蹤電源軌，這對於許多VSD中使用的複雜多控制器系統可能很重要。

POL電源架構設計很複雜，涉及與整體能效、成本、空間和雜訊相關的許多權衡。ADI的LTpowerCAD®、LTpowerPlanner®和LTspice®等工具有助於減輕設計難度。

圖8：多級開關穩壓器方法



## 總結

變速驅動器內的電源承擔著不同的功能，對於驅動器的整體運行非常重要。對於許多此類電源而言，出於電氣安全原因進行隔離，或是基於電壓基準位準進行電氣分離，都是不可或缺的重要措施。

本章討論了變頻驅動器中，為了提供主控電源及逆變器電子元件（包括閘極驅動器和電流感測電路）電源，所涉及的各項要求和電路設計。重點強調了保護電路的重要性，並提及與POL低壓電源設計相關的挑戰。



## 逆變器級：釋放電力電子的力量

逆變器級可比喻為驅動器的「肌肉」，作為電力電子模組直接向馬達提供經過調節的穩定電源，以最終應用所需的方式驅動馬達，進而提供產生扭矩所需的電流，產生調節速度和磁通所需的電壓，並高效地控制速度和扭矩所需的頻率和相位關係。

在[上一章](#)中，我們介紹了變速驅動器(VSD)內的電源功能。而在本章節，我們將進入驅動器的核心——逆變器級。圖1突出顯示了逆變器級。

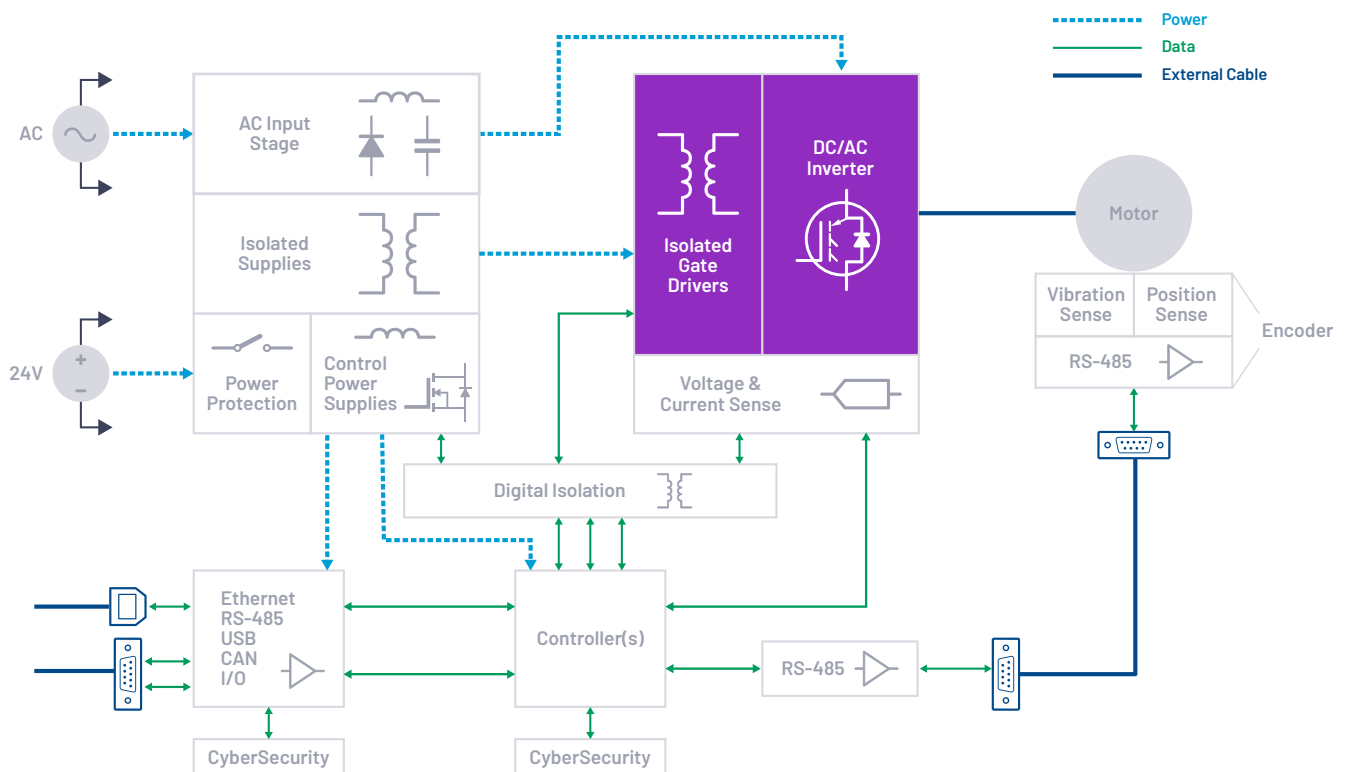


圖1：變速驅動器的詳細架構

逆變器級的基本結構包含兩組輸入和一組輸出。主電源輸入是直流母線（[上一章輸入級](#)中討論過）。主電源輸出是馬達的三相線。主控制輸入是逆變器每個橋臂中每個開關功率電晶體的閘極訊號。逆變器有多種類型，不同類型的逆變器具有不同的相位數和不同的電源電子拓撲結構（多位準、矩陣等），但市面上絕大多數逆變器都是三相、兩位準逆變器，如圖2所示。

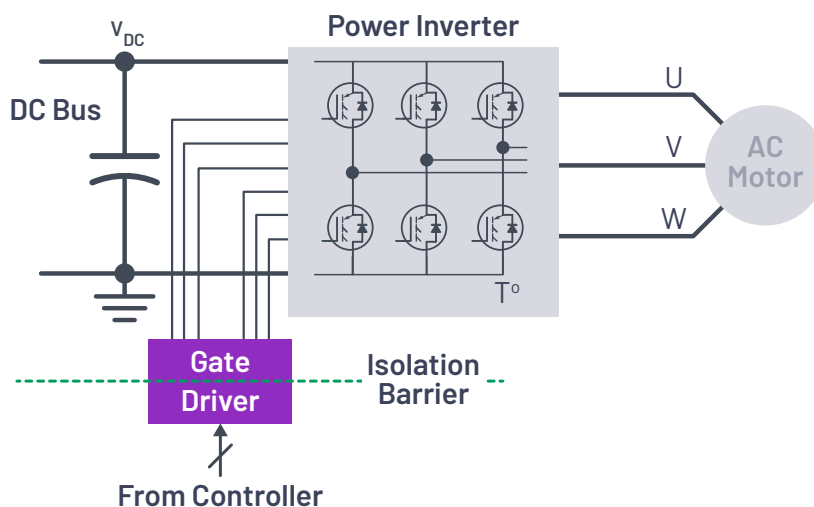


圖2：逆變器級驅動三相馬達功率電晶體

逆變器每個橋臂中的功率電晶體都是功率開關元件，以高頻率（通常在5-20kHz範圍內）和受控的工作週期或調變指數完全導通或完全關斷。功率電晶體充當準理想開關，調變施加於每個馬達相互繞組上的電壓，並重新創建一個波形。該波形具有與馬達速度（通常在DC-1kHz範圍內）和暫態位置相關的低頻分量（通常為正弦波），以及與馬達速度和額定磁通量相關的平均電壓幅度，如圖3所示。輸出逆變器相至負極的電壓是一個在直流母線電壓和零之間切換的脈寬調變方波。馬達繞組的固有電感會對此訊號進行濾波，產生一個具有所需低頻相位、頻率和幅度的馬達電流，但其中存在一些不良的開關頻率漣波。

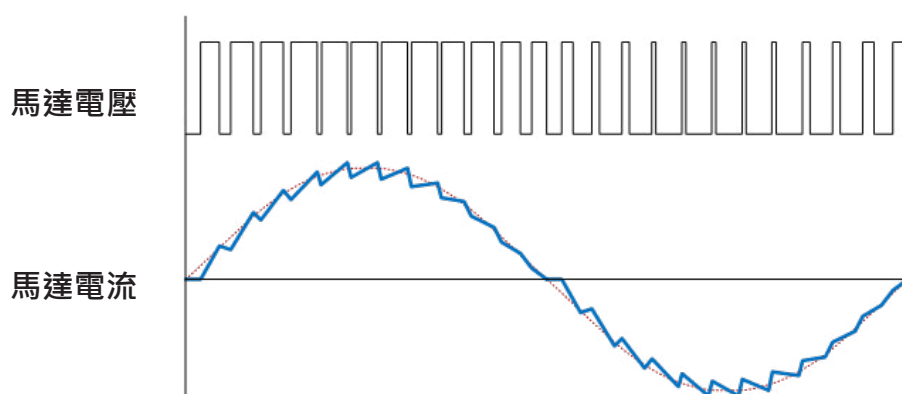


圖3：逆變器相輸出電壓和電流

功率電晶體和相關的熱管理零組件（散熱器、風扇）通常是VSD中最昂貴的零組件，佔用的空間往往也最多，尤其是在功率水準較高的情況下。電晶體之所以有功率損耗，是因為其並非理想開關，在傳導電流時，兩端存在較小電壓降，並且當開關內的高電壓和大電流短時間重疊時，導通和關斷的開關時間不為零，進而導致開關損耗。從歷史上看，MOSFET和IGBT一直主導著功率電晶體市場，但近年來，開始轉向更寬頻隙的SiC和GaN功率電晶體。這些電晶體的開關損耗更低，可以實現更高開關頻率的逆變器，或在相同開關頻率下實現更高能效的逆變器。

## 閘極驅動器

閘極驅動器提供的其他功能包括：

- ▶ 功率電晶體保護（例如逆變器/馬達短路情況下的去飽和檢測）
- ▶ 功率電晶體的受控切換（例如，對閘極驅動訊號應用不同的擺率以管理某些情況下的EMI）
- ▶ 馬達控制器與逆變器級的電氣和安全隔離
- ▶ 報告逆變器和功率電晶體的故障情況

因此，**閘極驅動器**既可以是具有完整通訊介面的複雜元件（如[ADuM4177](#)），也可以是僅有驅動功能的簡單元件（如[MAX22700](#)）。無論**閘極驅動器**包含哪些功能，**抗瞬變穩健性**（以**共模瞬變抗擾度CMTI**等參數來表示）都是一項重要特性，因為這些元件處於**逆變器**的一個高雜訊域中，需要能夠在**馬達控制器**的低雜訊、低壓環境與**功率電晶體**的高電壓、大電流、高雜訊域之間運行。

## 總結

功率逆變器是VSD的核心，負責管理施加於馬達的電流和電壓。功率逆變器內功率電晶體的安全、穩健、高效切換，是VSD內閘極驅動器承擔的一項重要功能。[下一章](#)將討論在逆變器級內測量的一些訊號，以便精準控制逆變器級的運行。



# 運用電流感測增強馬達控制

上一章著重闡述了逆變器的控制對於驅動器整體運行的重要性。任何閉迴路控制系統通常都需要一個設定點（例如所需的工作點）和一個與之比較的測量變數（稱為回饋），使得控制迴路可以對這兩個量之間的差異做出回應。在驅動器中，關鍵測量變數通常是馬達電流和馬達位置。其他變數（如直流母線電壓）也有助於控制迴路的運行。

在本章中，我們將討論電流回饋和直流母線電壓的測量，這些活動發生在上一章介紹的逆變器級中，下面的架構示意圖同樣重點顯示了此部分內容。

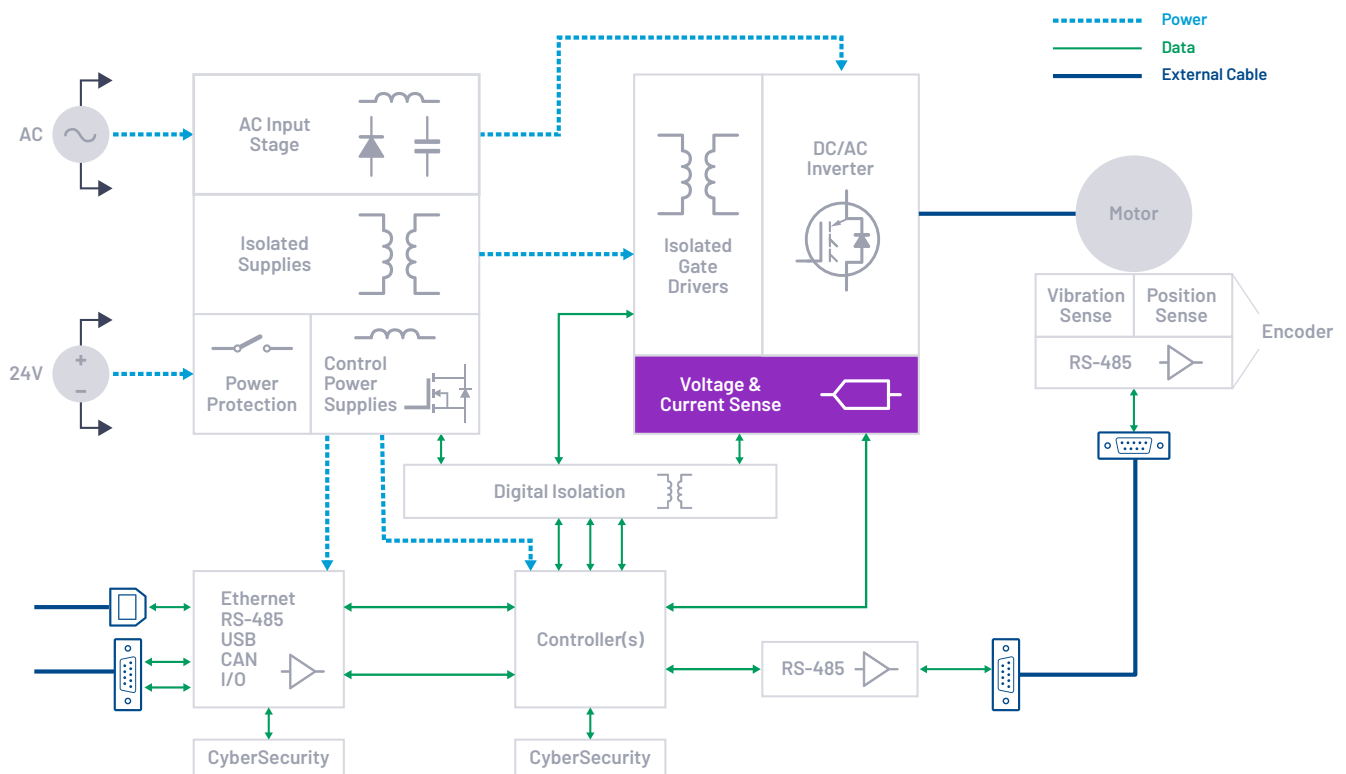


圖1：伺服驅動架構示意圖

在驅動器中，關鍵測量變數通常是馬達電流和馬達位置。

在電流回饋路徑中，重要的是測量活動與PWM週期同步，進而不將高頻開關電流漣波引入回饋路徑。為此，需要精準控制電流採樣時序，進而在波形的中點進行採樣。此時的波形，暫態電流等於PWM週期平均值，測量中不會包含任何PWM開關漣波電流。圖2以簡化的方式解釋了這一情況，其中顯示了相電流波形上的採樣點，以及其與PWM高端開關波形的相對對齊關係和開關週期 $T_{sw}$ 。PWM\_SYNC脈衝指示了在此場景中必須觸發電流採樣的時間點。在採用 $\Sigma\Delta$  ADC類型採樣（非單點採樣）的情況下，此點也可以理解為數位濾波器的中心點，參見<sup>[1]</sup>。

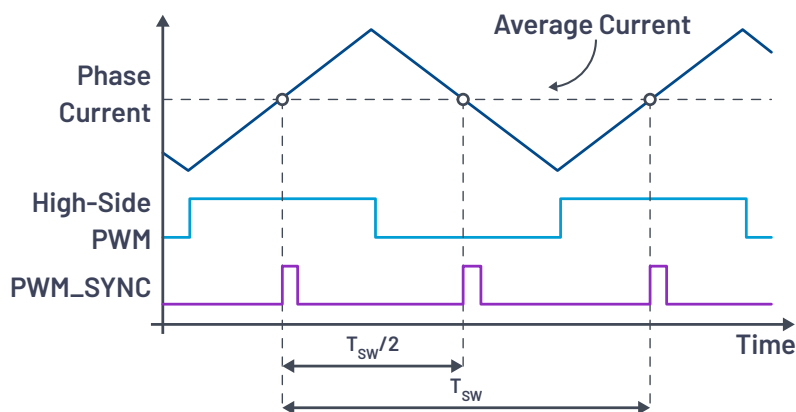


圖2：馬達電流中點採樣

對於至少兩個相位進行同步採樣也是必要的，但通常14-16位元測量解析度就足夠了，延遲須為微秒級，以便控制迴路可以在PWM週期時間( $T_{sw}$ )內做出回應，或者更高性能的控制迴路可以在1/2週期時間內做出回應。

有幾種不同方法可以實現電流測量，如圖3所示，圖中還提供了為20A應用實現相應方案所用的一些示例元件型號。測量馬達電流最準確的位置是在實際馬達相中，即逆變器的輸出線，但這些節點存在高電壓，因此通常需要電氣隔離。馬達電流測量值也可以從其他位置推斷出來，例如逆變器橋臂和直流母線正/負軌，不過這些測量位置雖然實施起來可能成本較低，但也有其他缺點。

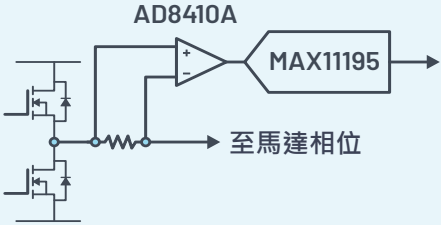
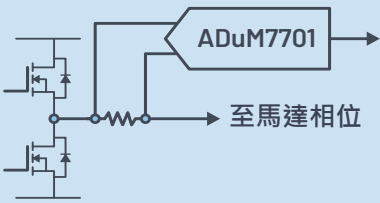
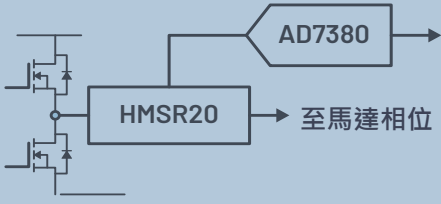
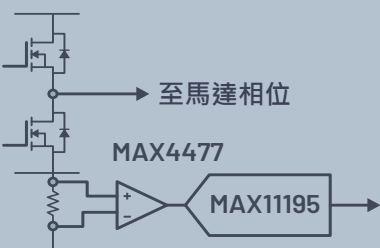
| 電流回饋方案                                                                              | 說明                                           | 備註                                          | 示例元件(20A)                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|    | 串聯分流電阻 + 高共模電壓(CMV) 運算放大器 + 同步採樣 ADC (SSADC) | 通常用於100V以下的應用，高CMV運算放大器通常在此範圍內工作            | CFN1206AFXR010 (Bourns)<br>AD8410A (ADI)<br>MAX11195 (ADI) |
|    | 串聯分流電阻 + 隔離式ADC                              | 最適合需要高抗擾度、精巧尺寸和高性能的應用。位元流輸出 - 需要數位濾波器       | CFN1206AFXR010 (Bourns)<br>ADuM7701-8 (ADI)                |
|  | 霍爾電流感測 + SSADC                               | 適合較高電流水準 (分流電阻在此情況下效率太低) 的解決方案              | HMSR 20-SMS (LEM)<br>AD8515 (ADI)<br>AD7380 (ADI)          |
|  | 橋臂分流電阻 + 運算放大器 + SSADC                       | 成本最低的解決方案 (因為如果控制器是直流母線接地，則無需隔離)。精度低於同相分流方案 | CFN1206AFXR010 (Bourns)<br>MAX4477 (ADI)<br>MAX11195 (ADI) |

圖3：電流回饋方案

高保真度、高精度電流回饋對於逆變器的整體控制迴路非常重要，對整體控制頻寬和扭矩漣波也有很大的影響。頻寬決定了馬達控制的瞬態性能，而瞬態性能在取放機等應用中非常重要。在研磨、切割和拋光等應用中，扭矩漣波會影響加工品質和成品公差。

電流回饋是從逆變器到控制器的最重要回饋變數，而直流母線電壓作為控制前饋變數也很有價值。其不是用於受控量，但因為直流母線電壓的變化會影響電流控制迴路的動態性能，所以可以用於前饋變數，用於改善整體電流控制器的動態性能。結果如圖4所示。

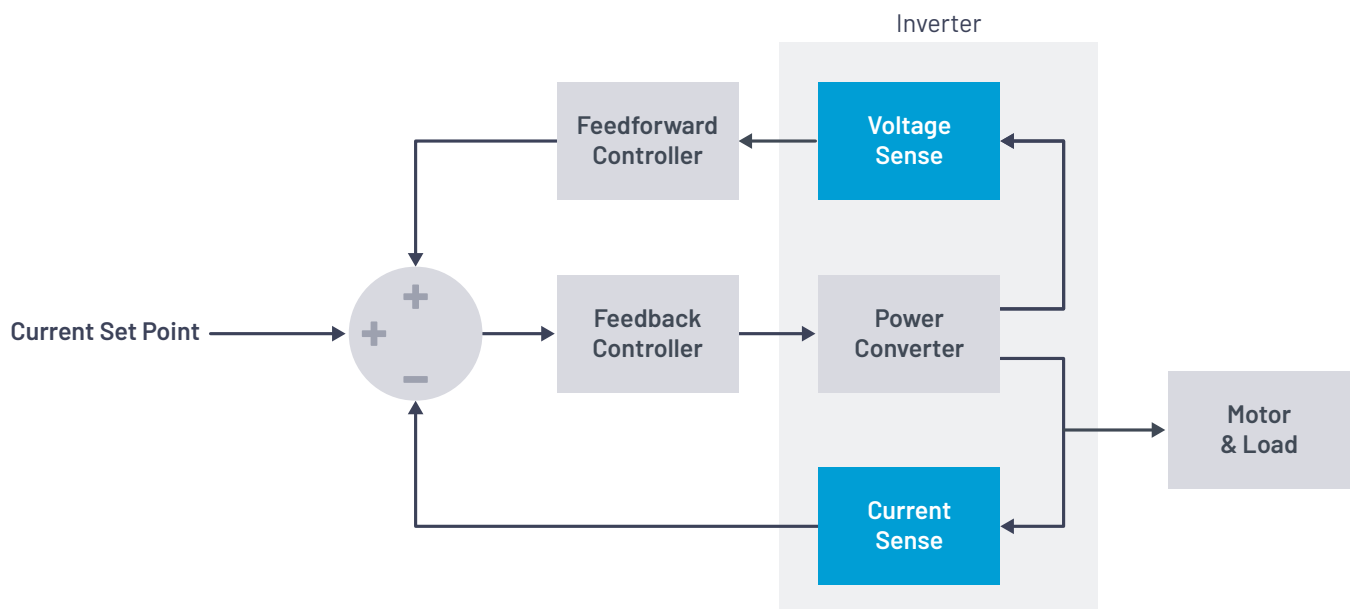


圖4：電流控制器框圖

如果控制器接地位於直流母線負極，則可以直接從直流母線兩端的分壓器獲得直流母線電壓檢測訊號；如果不是，則可以透過連接到分壓器輸出的隔離放大器或ADC（例如前面提到的ADuM7701）獲得。

下一章將討論另一個重要的回饋變數——位置感測，它與本章中介紹的電流和電壓感測一起用於馬達控制系統的另一組成部分。

## 參考資料

[1] 「第1部分：用於馬達控制的優化 $\Sigma$ - $\Delta$ 調變電流測量」，Jens Sorensen、Dara O'Sullivan和Shane O'Meara，<https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/optimized-sigma-delta-modulated-current-measurement-for-motor-control.html>

## 如何看待位置感測？

在上一章中，我們探討了電流控制迴路，並介紹了提供回饋變數的電流和電壓感測電路。本章將探討對許多驅動器都很重要的另一個感測變數——馬達位置感測和回饋。

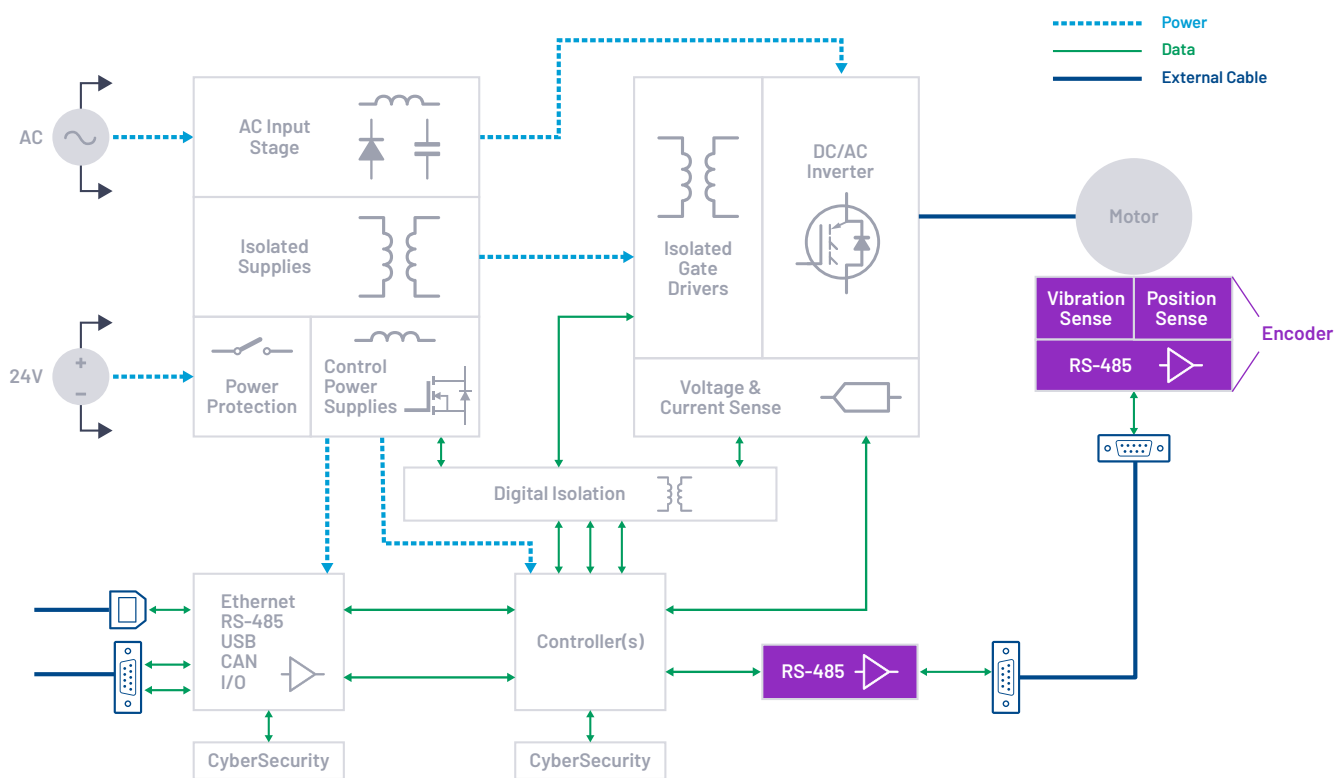


圖1：伺服驅動架構示意圖

同樣的，本章探討的模組在以上的架構示意圖中以重點顯示。這些模組中的大多數實際上並不位於馬達驅動器本身，而是位於一個稱為編碼器的位置回饋元件內，編碼器通常與馬達本身整合，或作為與馬達緊密耦合的單獨元件加裝。編碼器的用途是即時測量馬達轉子（旋轉零組件）的位置，而對於永磁或同步馬達，則是測量轉子磁場的位置及其純機械位置。

本章不會詳細介紹編碼器，而是討論與驅動器本身相關的位置回饋方面一些具體事項。

## 馬達位置控制在機器人、取放和其他動態應用中非常重要。

### 是否始終需要位置回饋？

需要指出的是，許多性能較低的馬達驅動器在連接到感應馬達時，無需位置回饋即可運行。這是因為，感應馬達內的磁場是由施加的定子電壓引起的（感應馬達正是因此而得名），故馬達旋轉頻率會自動與所施加的三相電壓頻率保持同步（存在一個較小差值，稱為「滑差」）。在此類開迴路驅動器中，馬達沒有安裝編碼器，控制器也不使用位置回饋。

### 位置回饋在驅動器中具有什麼作用？

永磁/無刷直流(BLDC)馬達伺服驅動器由於以下兩個原因，而需要位置回饋。第一個原因是為了讓馬達磁場位置與伺服驅動器施加的馬達電壓和電流同步。轉子磁場與定子繞組中因施加三相電流而產生磁場相互作用，並由此產生馬達扭矩。這些磁場必須彼此同步，否則無法產生有用的扭矩。事實上，為使每安培馬達電流產生的扭矩最大，這些磁場必須在空間中彼此正交，並且在時間上同步（稱為磁場定向控制FOC）。

位置感測的第二個功能是作為位置控制或速度控制迴路中的回饋變數，用來精準控制馬達的速度或位置。馬達位置控制在機器人、取放和其他動態應用中非常重要。馬達速度控制在機械加工、輸送帶、滾筒、捲繞等應用中也很重要。對於速度控制，速度回饋值通常是位置回饋的導數。圖2顯示了位置回饋訊號在馬達驅動器控制器中的這些用途，驅動器有內外兩個迴路：外迴路是位置控制迴路，內迴路是速度和電流控制迴路。

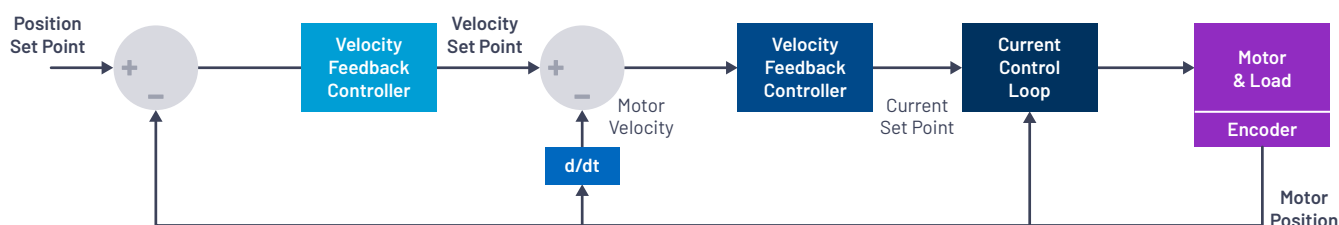


圖2：馬達位置回饋在驅動器中的用途

## 位置回饋如何從編碼器傳送到馬達驅動器？

工業應用中使用的大多數編碼器採用方波增量編碼器回饋（稱為ABZ或ABI），或基於數位協定的回饋。因此，大多數伺服驅動器需要能夠與這兩種訊號類型中的一種進行對接。有些編碼器還提供馬達繞組中嵌入的磁霍爾感測器產生的3個方波訊號，它們以較低解析度指示轉子磁場的絕對位置。基於數位協定的回饋採用特定協定，如EnDat<sup>[1]</sup>、Hiperface<sup>[2]</sup>、BiSS<sup>[3]</sup>。其中大多數是供應商專用協定，並且基於RS-422/RS-485作為實體層。在任何情況下，編碼器都必須具備對於靜電放電(ESD)、電快速瞬變脈衝群(EFT)及雜訊引起的共模電壓的抗干擾能力。此外，編碼器可能還需要支援連接長電纜。針對這些不同的介面，下表並提供了一些元件選用建議。

| 回饋類型 | 驅動器介面要求                                | 元件建議                              |
|------|----------------------------------------|-----------------------------------|
| ABZ  | 標準數位I/O - 可能需要差分式，<br>例如RS-422         | MAX14890                          |
| 霍爾   | 標準數位I/O                                | 任何標準緩衝器IC，<br>例如MC74AC125         |
| 協定   | 穩健的RS-485，最高可達30Mbps，<br>通常不隔離，但有時支援隔離 | ADM3065E<br>MAX22500E<br>(適用於長電纜) |

[下一章](#)將討論本章和上一章討論的兩種控制迴路（位置控制和電流控制）如何相結合，並在整體驅動控制器電子裝置內部實現。

### 參考資料

[1] [https://www.heidenhain.us/addl-materials/enews/stories\\_1012/EnDat.pdf](https://www.heidenhain.us/addl-materials/enews/stories_1012/EnDat.pdf)

[2] [https://cdn.sick.com/media/docs/5/65/865/operating\\_instructions\\_specification\\_hiperface%C2%AE\\_motor\\_feedback\\_protocol\\_en\\_im0064865.pdf](https://cdn.sick.com/media/docs/5/65/865/operating_instructions_specification_hiperface%C2%AE_motor_feedback_protocol_en_im0064865.pdf)

[3] <https://biss-interface.com/c/downloads/biss-interface/>



# 強勁動力背後的「大腦」：現代馬達驅動器中的控制器和處理器

上一章研究了位置回饋系統，介紹了如何透過編碼器將馬達位置資訊提供給馬達驅動器。本章討論馬達驅動器系統的「大腦」——控制器模組。

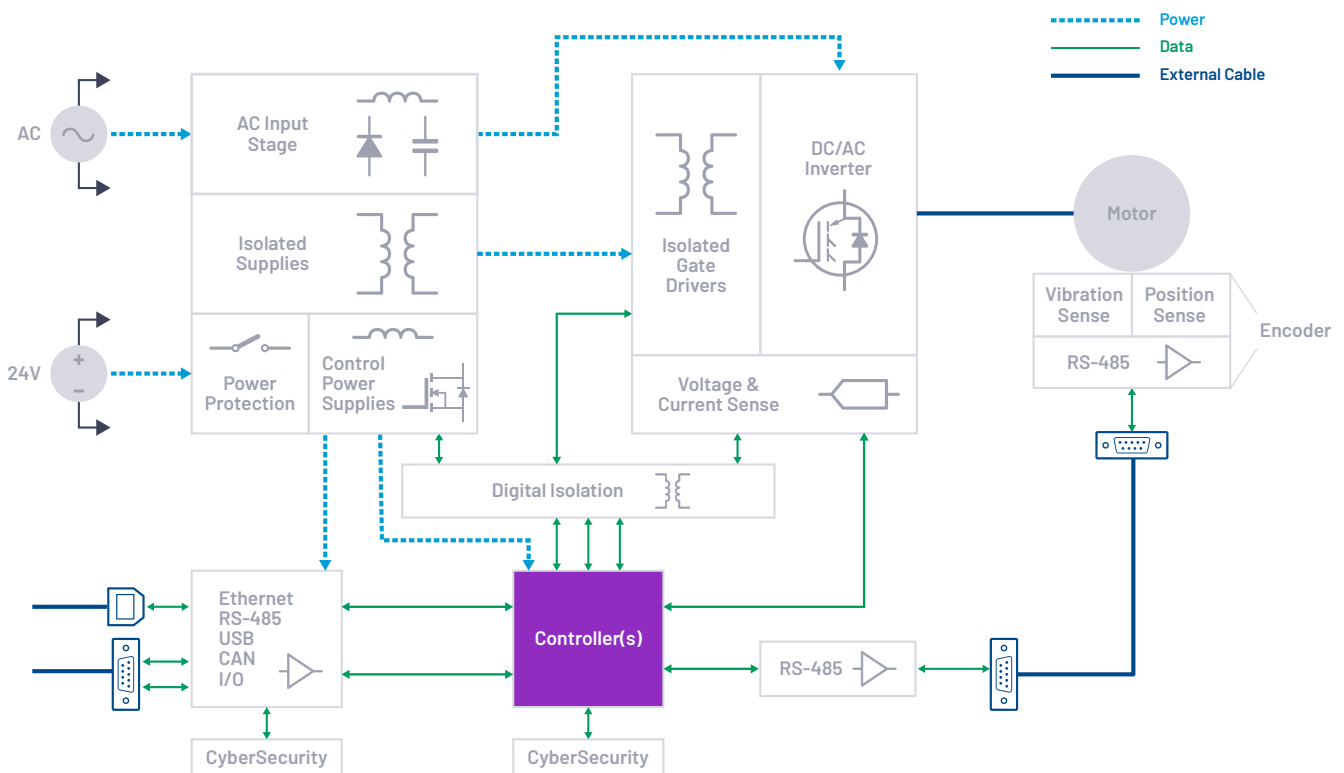


圖1：伺服驅動架構示意圖

同樣的，本章探討的概念模組在上面的架構示意圖中以重點顯示。從圖中可以清楚地看出，控制器確實是系統的核心，其他每個模組都以某種形式與其連接。本章將研究與控制器模組相關的兩個主要方面：功能和實現。從一開始就必須強調的是，雖然在概念上，其顯示為單一模組，但實際上，它通常由一個以上的IC組成。在建置這個部分中將會詳細地討論此方面內容。

## 控制器模組實現了哪些功能？

控制器的一大核心功能在於實現馬達驅動器控制迴路，而這個功能對控制器的設計和架構有著重要影響。在某種意義上，所有其他功能都是輔助性的，有些甚至是可選功能，但控制迴路的執行是控制器唯一不可或缺的功能。前面已經介紹了馬達驅動器所需的控制迴路，圖2中再次顯示了這些迴路，陰影部分表示控制器內部的情況。

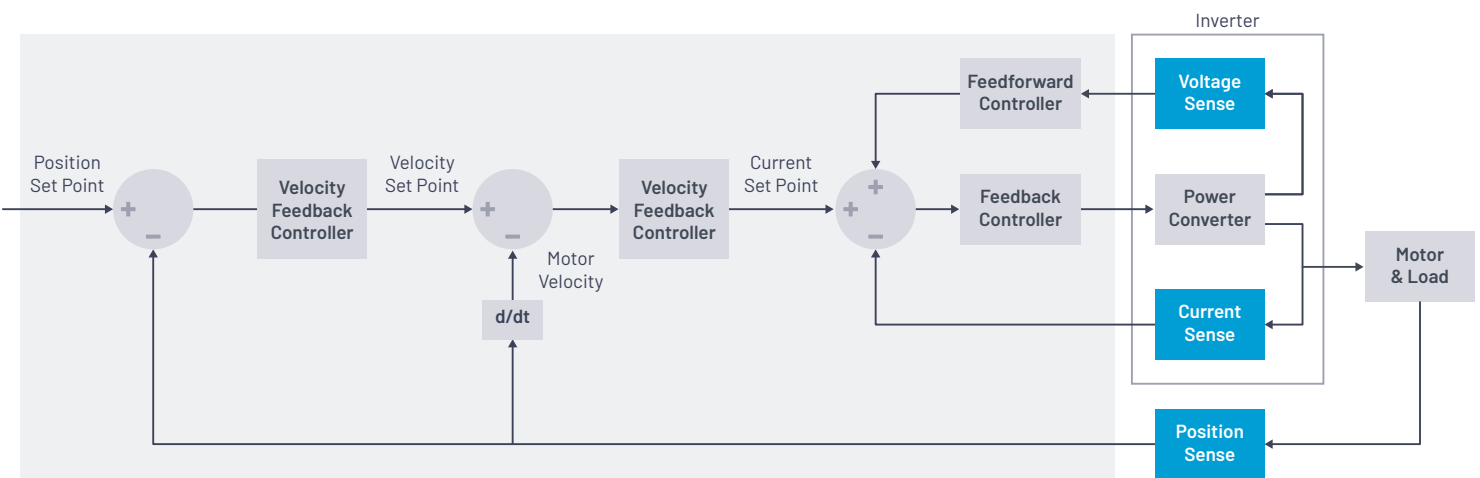


圖2：馬達控制迴路

在更簡單的驅動器中，並非所有模組都會被實現，而在最簡單的驅動器中，甚至沒有閉迴路控制，通常只有一個非常簡單的開迴路控制器，如圖3所示，其中控制器內的部分同樣以陰影表示。在這些非常簡單的系統中，沒有回饋或回饋非常有限，並且控制器可以是相對簡單的元件。在本章的後續討論中，假設系統如圖2所示，同時假設控制迴路全部在數位引擎（例如微處理器或FPGA）中建置。除了一些非常特殊的應用外，馬達控制已不再使用模擬控制。

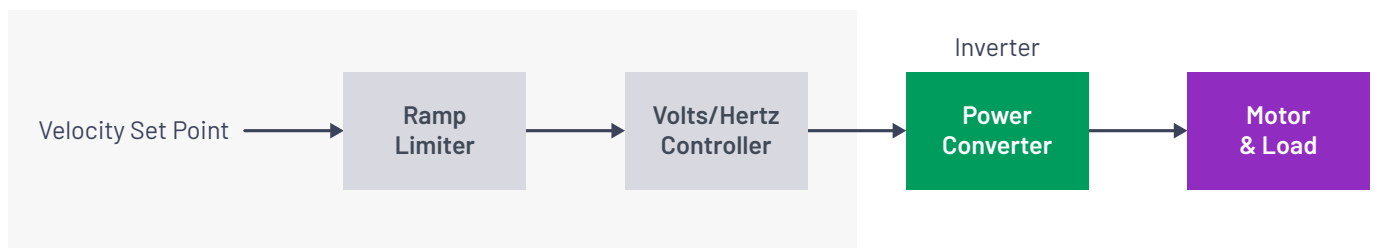


圖3：簡單的開迴路驅動控制器

## 馬達驅動器控制迴路的執行是控制器唯一不可或缺的功能。

控制器在實現驅動控制演算法時，一個關鍵要求是這些數位控制迴路必須以即時且具有確定性的方式實現。假設控制迴路更新速率為10kHz，那麼控制演算法必須始終在10kHz時間視窗內實現。控制迴路任務必須始終享有最高優先順序。如果控制迴路任務超時，馬達控制將停止工作，這常常會導致馬達損壞，因為電源轉換器將無法正確切換。

除了控制迴路（以及編碼器和電流感測器等回饋元件的相關資料處理）之外，控制器還必須實現其他多種重要功能：

- ▶ 通訊介面：工業乙太網路軟體協定堆疊，例如用於與PLC和其他設備通訊的乙太網路I/P、用於使用者介面的USB
- ▶ 使用者或診斷應用程式：資料記錄、驅動器/馬達診斷或驅動器配置應用程式
- ▶ 系統管理：啟動控制，監控驅動器故障，向控制迴路傳遞命令和參考訊號
- ▶ 物理安全功能：監控和管理物理安全功能，例如安全扭矩關斷(STO)
- ▶ 資訊安全功能：管理安全引導、安全通訊和安全韌體更新，通常與身份驗證器等安全硬體結合使用

## 控制器通常如何實現？

很明顯的，控制器需要處理許多平行作業，必須保證控制迴路即時執行，不受其他任務影響。

### 1. 單控制器IC

採用單控制器IC方法時，一切都在一個微處理器或系統單晶片(SoC)中實現。隨著馬達驅動器越來越複雜，需要更多的網路介面、使用者功能、診斷和安全功能，因而這種方法變得越來越少見。但在不太複雜的驅動器和開迴路逆變器中，如圖3所示，其仍然很常見。而在更複雜的驅動器中，可以使用Xilinx Ultrascale等複雜SoC。透過將多個高性能處理核心與可配置的數位模組相互結合，可以有效實現不同控制器功能的劃分。

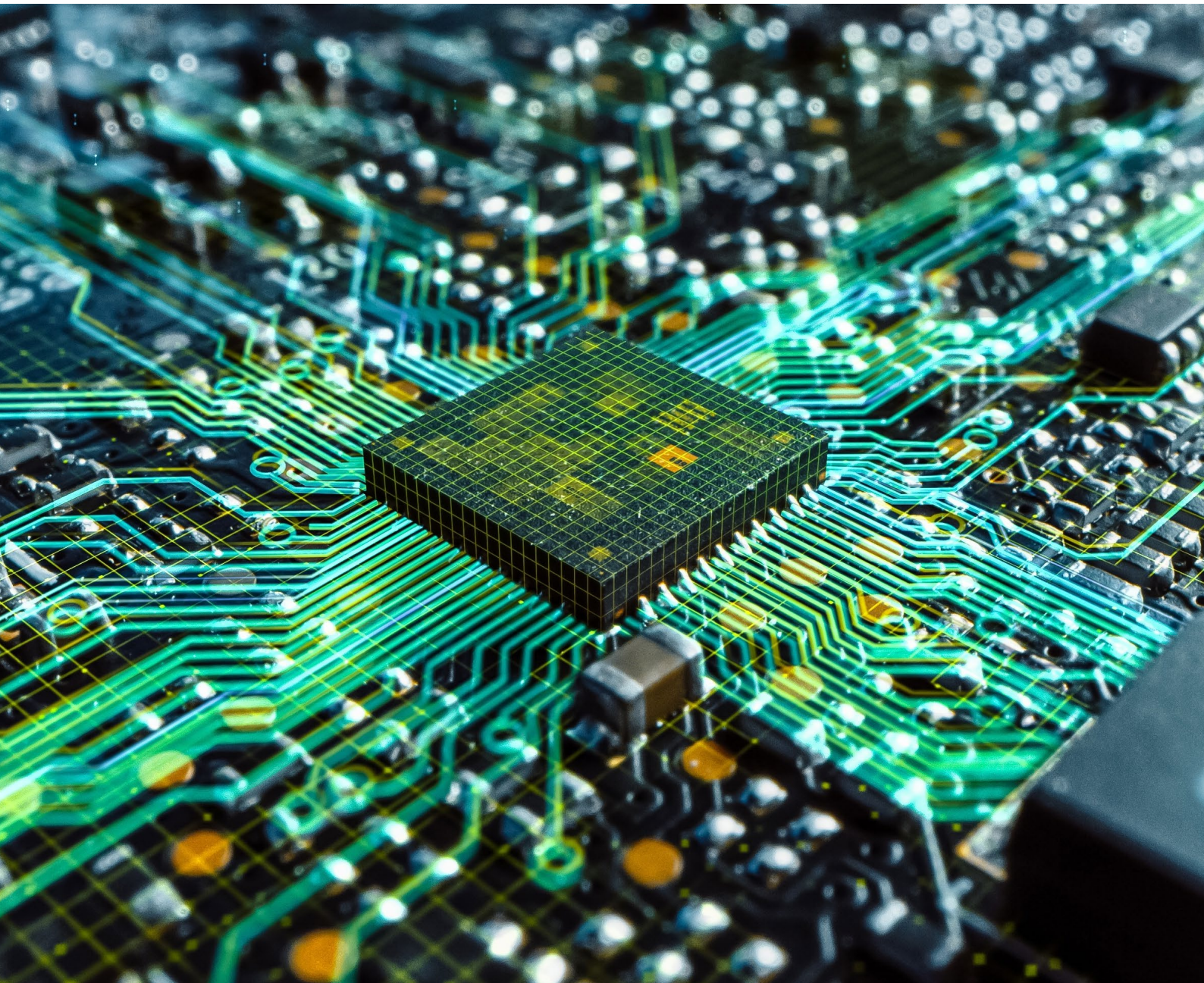
### 2. 單獨的電流迴路控制器IC

在許多驅動架構中，電流控制器功能（包括電流回饋的處理和脈寬調變(PWM)功能）是作為單獨的IC來進行處理，通常位於與功率逆變器相同的參考接地端上。

此功能對具有確定性的即時操作有著極為嚴格的要求，因此建議採用以下幾種實現方案：具有馬達控制專用周邊的分立專用微控制器；FPGA SoC，例如Xilinx Zynq；或小型FPGA與微控制器的組合。在此類架構中，位置/速度控制器和其餘控制器功能將在一個更強大的微處理器上實現，其通常位於驅動架構的安全接地側。

### 3. 單獨的網路通訊協定堆疊和介面IC

最後，網路介面功能可以獨立出來，透過網路通訊協定堆疊處理器、ASIC或FPGA實現。此種劃分方式非常實用，既能單獨處理工業乙太網路介面的複雜性，又能使另一處理器專注於使用者介面、安全功能和診斷任務。這種方式能夠簡化網路介面的模組化設計，支援多種協定，並且有效隔離各種網路流量問題。



# 建立正確的連接與馬達驅動器應用進行通訊

上一章探討了馬達驅動器應用的核心部分——主控制器。在本章中，我們將深入探討連接所發揮的關鍵作用。

要從主系統控制器（通常是可編程邏輯控制器(PLC)）向馬達驅動器發送所需的控制輸入，系統必須連接網路。除控制輸入外，驅動器還有許多參數需要使用使用者進行配置和參數化。使用者/控制系統可能需要從馬達驅動器中收集即時值（如扭矩、電流、速度、位置）、設定的斜率和單位以及許多其他參數。所有這些都是透過外部介面進行通訊，即圖1重點顯示的部分。從廣義上講，更強的驅動器連接能力，尤其是基於乙太網路的連接，被認為是自動化產業數位化的一個關鍵因素，因為其能夠為自動化系統中的每個終端設備提供可見性和網路存取能力。

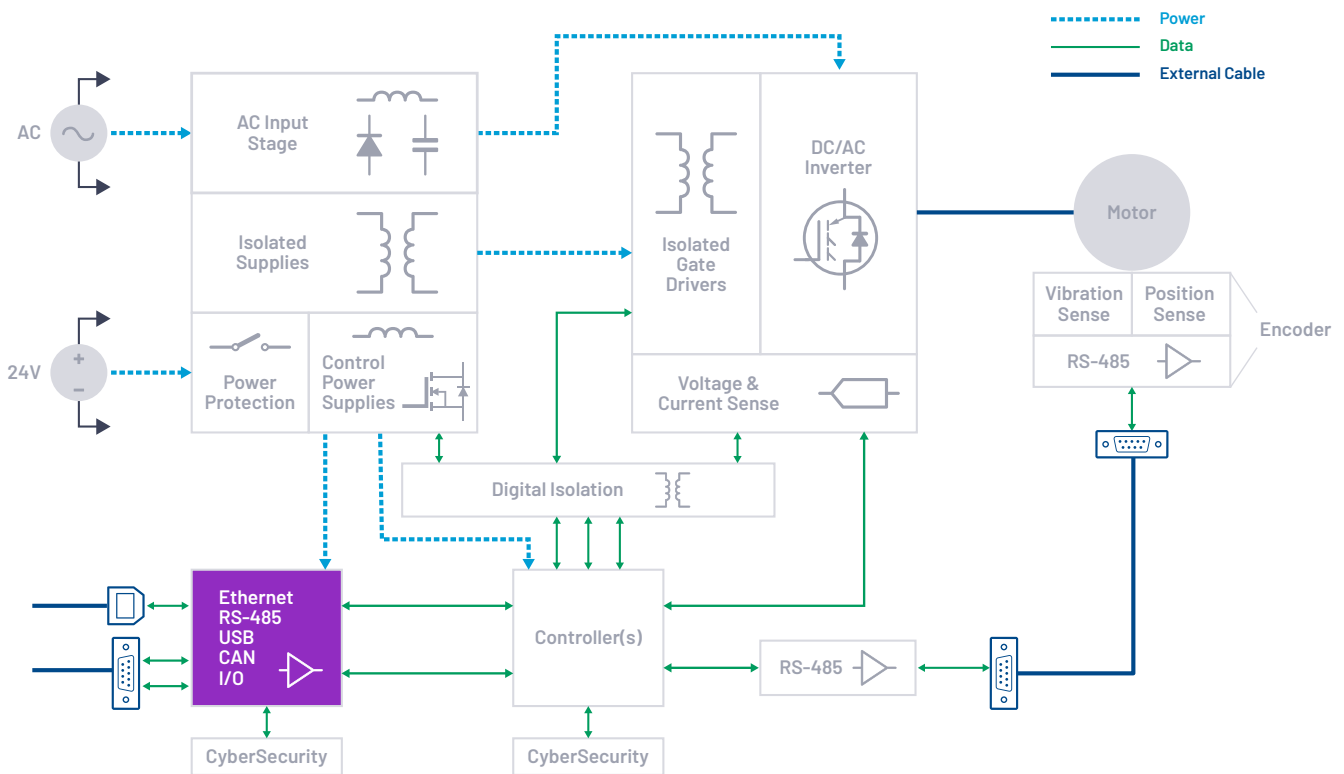


圖1：變速驅動器的詳細架構

ODVA、PI North America和EtherCAT Technology Group等組織，透過定義EtherNet/IP、PROFIBUS/PROFINET和EtherCAT等協定，說明推動馬達驅動器通訊的標準化。這些是當今工業自動化領域最常用的協定<sup>[1]</sup>。物理通訊層最常見的類型是串列鏈路（如RS-485或RS-422）和乙太網路。協定建立在這兩個實體層之上。那麼，針對具體連接解決方案，應該選擇哪種協定？我們先來梳理關於PROFIBUS/PROFINET、EtherNet/IP和EtherCAT的主要資訊，然後據此做出決定。

## PROFIBUS/PROFINET

PROFIBUS是串列鏈路(RS-485)上使用最廣泛的協定，而PROFINET使用的是乙太網路。PROFIDRIVE是驅動器技術的標準「應用協定」，位於PROFIBUS和PROFINET通訊系統之上，如圖2所示。

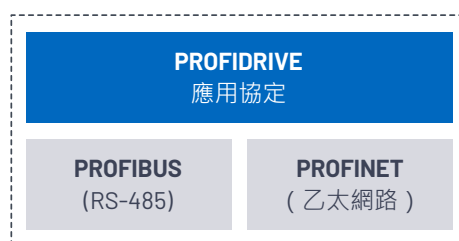


圖2：PROFIDRIVE協定

PROFIDRIVE等協定定義了特定於應用的參數和功能，使得馬達驅動器等相似設備之間更容易透過網路進行通訊<sup>[2]</sup>。PROFIDRIVE支援將標準驅動和「運動控制」功能與PLC時序控制邏輯相整合，主要功能包括：

- ▶ 馬達電流控制
- ▶ 速度控制
- ▶ 位置控制
- ▶ 路徑插值
- ▶ 邏輯控制

## EtherNet/IP

EtherNet/IP基於標準乙太網路實體層，其可支援點對點連接，並且也允許利用通用工業協定(CIP)在多個控制器和驅動器之間分發即時運動控制資訊。驅動器應用協定CIP Motion是CIP的一部分，建立在通用標準乙太網路協定堆疊之上。表示除了IEEE-802.3規範中定義的實體層和資料連結層之外，CIP還使用一般乙太網路應用中通常部署的標準網路層和傳輸層。因此，裝置可以透過標準交換器、路由器和其他基礎設施元件輕鬆互連。

CIP Motion點對點連接目的在透過單一多播連接，將高速運動資料從生產控制器或裝置傳輸到多個消費控制器或裝置<sup>[3]</sup>。

## EtherCAT

EtherCAT是一種即時工業乙太網路技術，最初由Beckhoff Automation研發。EtherCAT在研發時注重三個方面：短週期時間( $\leq 100 \mu\text{s}$ )，透過低抖動實現精準同步( $\leq 1 \mu\text{s}$ )，低硬體成本。EtherCAT將有效載荷嵌入到標準乙太網路幀中。EtherCAT協定針對短週期過程資料進行了優化，因此無需TCP/IP或UDP/IP等龐大的協定堆疊。當應用中有多個分散於各處的流程且需要同時操作時，精準同步尤為重要。相較於完全同步通訊（通訊錯誤會直接影響品質），分散式同步時脈對通訊系統中的抖動具有很高的容忍度。因此，EtherCAT節點同步解決方案基於分散式時脈(DC)<sup>[4]</sup>。CAN over EtherCAT (CoE)，尤其是CiA 402協定，這是馬達驅動器最常用的EtherCAT應用協定。透過CoE協定，EtherCAT提供與CANopenR標準EN 50325-4相同的通訊機制：物件字典、過程資料物件(PDO)和服務資料物件(SDO)的映射。



甚至網路管理也與其相似。因此，原本使用CANopen的裝置現在可以輕鬆實現EtherCAT，甚至CANopen韌體的大部分都可以直接複用。裝置協定（例如CiA 402驅動協定）也同樣可以直接用於EtherCAT。

| 協定                    | 馬達驅動器應用    | 案例/特性                                                                                      | ADI支援產品              |
|-----------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| EtherCAT              | CiA 402    | EtherCAT針對需要嚴格同步的應用進行了優化，支援低至50us以下的快速週期時間，最適合伺服驅動器                                        | ADIN1200             |
| PROFINET/<br>PROFIBUS | PROFIDRIVE | PROFINET擁有最大的市場份額，可以連接非常廣泛的自動化硬體和基礎設施，尤其是西門子的裝置。                                           | ADIN1300<br>FID05200 |
| Ethernet I/P          | CIP Motion | Ethernet I/P的功能最透明，適合與其他乙太網路流量和系統協同工作，在美國系統中佔主導地位。相較於EtherCAT和PROFINET IRT，其通常不支援亞毫秒級週期時間。 | ADIN2299<br>MAX14942 |

## 哪項協定最終勝出？

下表比較了本章重點介紹的三種通訊協定。每種協定都有其優勢和適合特定應用的特性。下表還列出了ADI的一些支援所有這些協定的典型產品<sup>[5]</sup>。

### 參考資料

[1] “Industrial Communications Report – 2023 Analysis” · Omdia

[2] [PROFIdrive – The Leading Drive Control Profile: PROFINET](#)

[3] [CIP Motion | Common Industrial Protocol | ODVA Technologies](#)

[4] [EtherCAT Technology Group | HOME](#)

[5] [ADI公司工業乙太網路解決方案](#)

# 為驅動器的未來提供安全保障

在本電子書的最後一個章節中，我們將簡要說明概念化框圖的最後一個元素（圖1重點顯示的部分），即驅動器的網路安全。

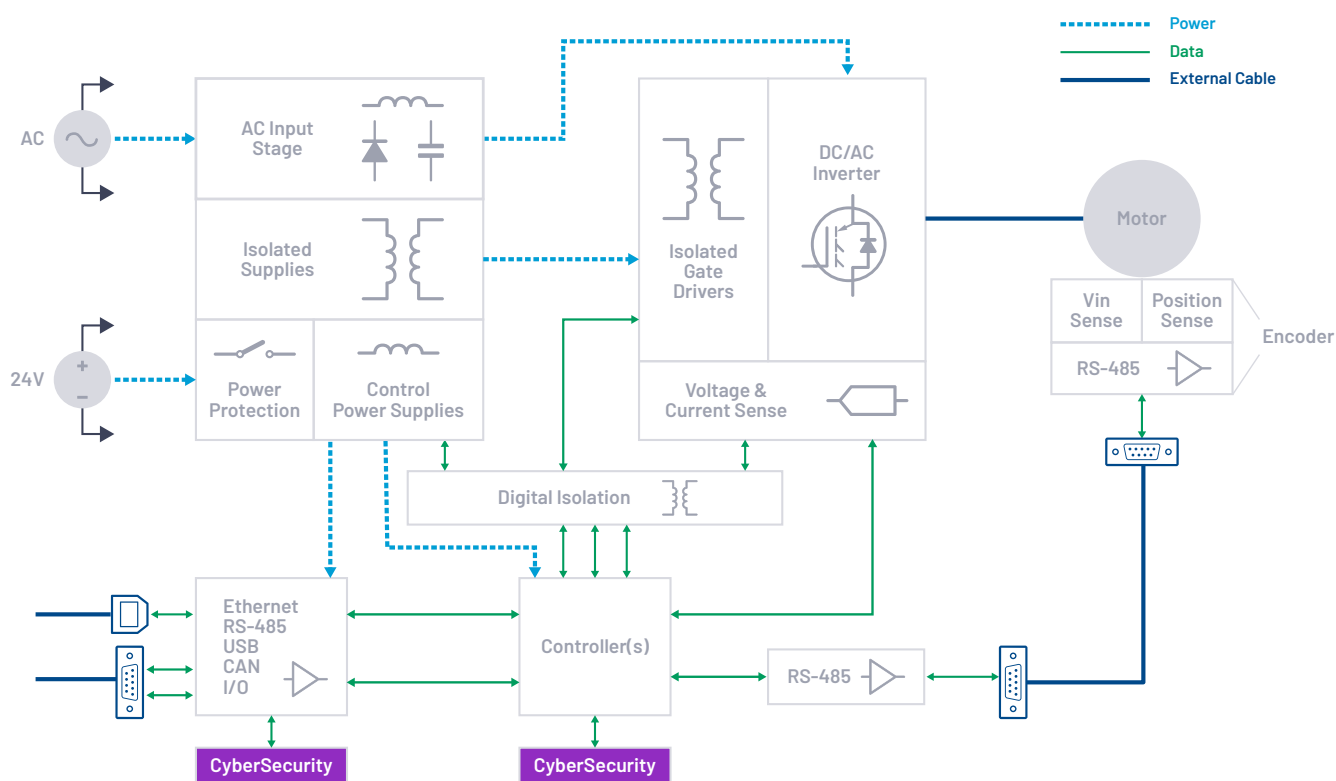


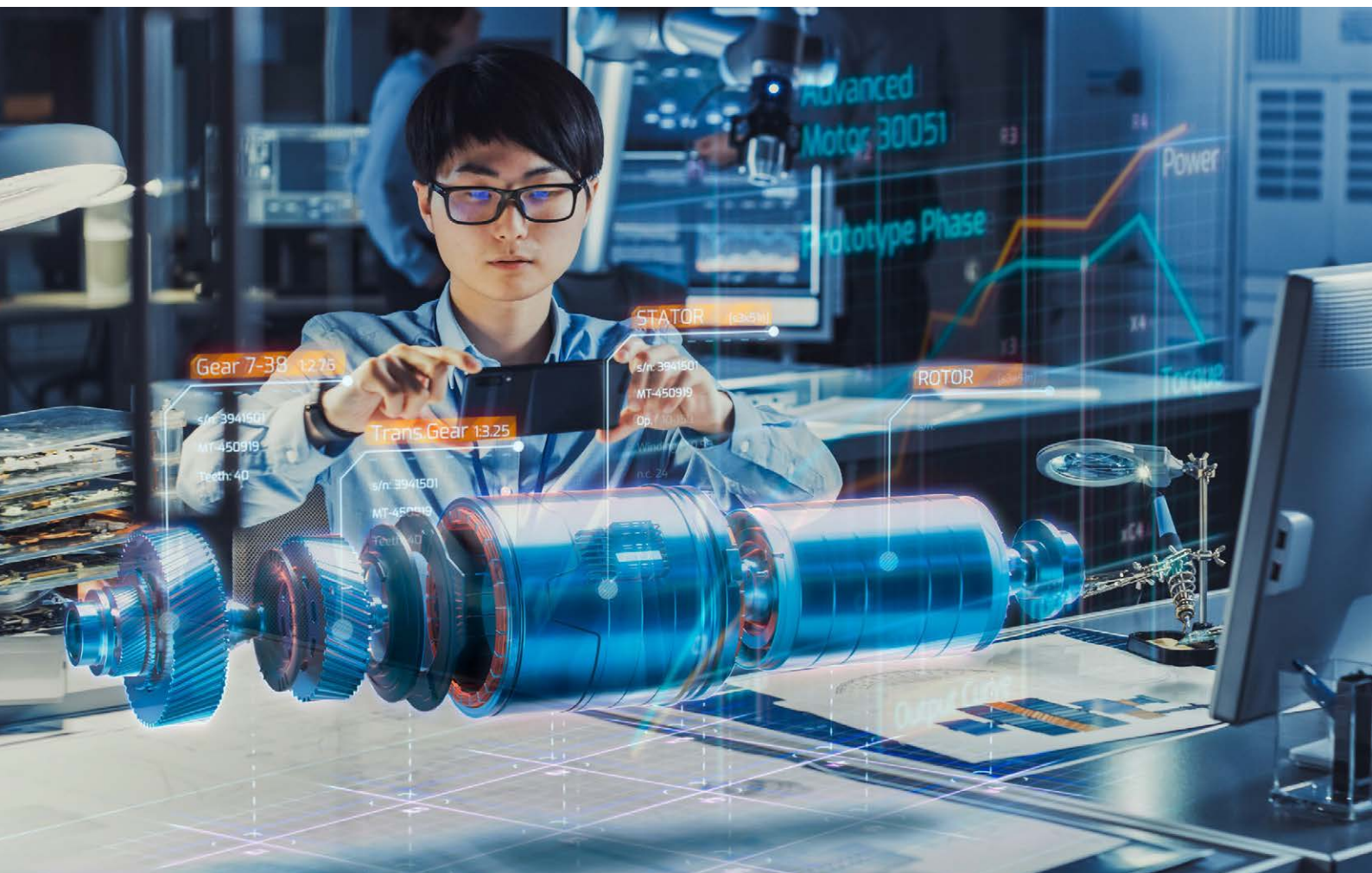
圖1：伺服驅動架構示意圖

馬達驅動器的網路安全是一個新興話題，長期以來並未受到開發者的重視。這是因為，在絕大多數應用中，馬達驅動器與外界完全隔離，避免了潛在的安全威脅。馬達驅動器過去通常不會直接或間接連接到工廠系統內的營運技術(OT)網路或雲端，因此可能發生未經授權存取的漏洞點非常有限。

## 為何馬達驅動器的網路安全越來越受關注？

正如上一章所述，大多數驅動器的乙太網路連接能力得到提升，因此情況正在發生變化。此外，廠商對網路安全性漏洞和潛在惡意行為者的防範意識有所增強，這些惡意行為者如果入侵供應商的系統，可能會對廠商的聲譽造成重大損害。即使對於無網路連接的系統，透過USB進行韌體升級現在也被視為安全性漏洞。另一個值得關注的領域與IP保護有關。馬達驅動器市場競爭日益激烈，驅動器製造商希望確保自身的控制軟體不會被從驅動器記憶體中擷取並遭受非法複製。

對於希望在歐盟銷售產品的驅動器製造商而言，面臨的另一個壓力是《網路彈性法案》(CRA)。這一項法案預計將於2025年生效，其要求每種含有數位元素、直接或間接連接到其他設備或網路的產品必須透過設計保證安全，滿足一系列網路安全要求，並且可能需要通過標準評估或協力廠商評估。儘管該法案的細節尚未最終確定，但對不合規行為可能會處以嚴厲的處罰，這表示每台新的馬達驅動器都必須具備全面的網路安全保護。



隨著數位化程度的提高，安全性成為一個無法迴避的議題。

## 哪些網路安全特性對驅動器製造商最為重要？

網路安全是一個極其廣泛的概念，涉及諸多方面，其重要性和具體含義會因應用場景的不同而有所差異。例如，在網路上購物時，保護信用卡詳細資訊等個人隱私資料在網路上的傳輸安全，可能是交易中最關鍵的需求。相較之下，當馬達驅動器在正常運行過程中透過網路交換資料時，一般來說資料本身並不是極為重要，原因是資料本身的有效時間通常非常短。電壓、電流或馬達速度等變數通常僅在幾微秒內有效，並且它們本身在任何特定時刻並不代表任何機密資訊。因此，就驅動器而言，資料隱私（需要採取加密等安全措施）就不是那麼重要。對驅動器而言，最重要的透過身份驗證機制確保所連接的物件的身份真實正確。例如，如果有指令發送至驅動器（如啟動/停止或更改設定速度），發送者可能是偽裝成可編程邏輯控制器(PLC)的惡意行為者，指令可能會對驅動器運行的流程造成損害。

驅動器的另一個重要安全環節是安全韌體更新。在驅動器的生命週期內，驅動器韌體升級可能會進行多次。當進行升級時，由於整個控制程式都被更改，驅動器可能暫時面臨安全風險。為了防止驅動器運行出現故障，確保安全更新和安全啟動（即驗證更新和啟動映射的真實有效性）極為重要。驅動器往往涉及危險和複雜的處理流程，例如加工廠操作、金屬成型、離心機等。因此，一旦驅動器發生故障，無論是控制代碼被意外或蓄意破壞，或是透過網路傳輸的指令/參數出現錯誤都可能造成嚴重的物理損壞和聲譽損失。

## 如何實現這些功能特性？

網路安全功能有很多種建置的方式，而其中通常涉及硬體和軟體的結合。ADI提供了一系列安全認證器和安全微控制器產品，既有1-wire安全認證器DS28E30等簡單的元件，也有MAXQ1065等安全微控制器。這些產品可結合主系統控制器提供簡單的信任根功能，或是提供更完整的加密功能，以協助滿足未來馬達驅動器的要求。

文章至此，我們完成了對馬達驅動器的深入解析，闡述了從交流輸入功率級到控制器、通訊和安全的各個層面。隨著馬達控制技術在現今世界的眾多領域日益普及，希望透過這些章節的介紹，能使讀者對電子馬達控制此一迷人的領域有更深的認識。

## 電源管理

|          |                     |
|----------|---------------------|
| LT8315   | 微功耗無光耦隔離反馳式轉換器      |
| MAX17690 | 無光耦隔離反馳式控制器         |
| LT4363   | 高壓湧浪抑制器             |
| LTC4381  | 具有湧浪保護功能的低靜態電流eFuse |
| ADP5054  | 整合式四通道降壓調節器電源解決方案   |
| MAX14721 | 高精度可調功率限制器          |

## 閘極驅動器

|           |                      |
|-----------|----------------------|
| ADuM4177  | SiC隔離式閘極驅動器          |
| ADuM4221  | 隔離式半橋閘極驅動器           |
| MAX22700E | 具有超高CMTI的單通道隔離式閘極驅動器 |

## 電流和位置回饋

|           |                                 |
|-----------|---------------------------------|
| AD8410A   | 高壓、高頻寬電流感測放大器                   |
| MAX11195  | 雙通道14位元同步採樣SAR ADC              |
| AD7380    | 雙通道16位元同步採樣SAR ADC              |
| ADuM7701  | 16位元隔離式 $\Sigma$ - $\Delta$ 調變器 |
| AD8515    | 低功耗CMOS運算放大器                    |
| MAX4477   | 低雜訊、低失真、寬頻、軌對軌運算放大器             |
| MAX14890E | 增量式編碼器接收器                       |

## 通訊

|           |                                 |
|-----------|---------------------------------|
| ADIN1200  | 10 Mbps和100 Mbps乙太網路PHY         |
| ADIN1300  | 10 Mbps、100 Mbps和1Gbps乙太網路PHY   |
| FID05200  | 即時乙太網路多協定(REM)交換器晶片             |
| ADIN2299  | 多協定雙埠工業乙太網路平台                   |
| MAX14942  | 20 Mbps隔離式RS-485/PROFIBUS-DP收發器 |
| ADM3065E  | 50 Mbps半雙工RS-485收發器             |
| MAX22500E | 適用於長電纜的100 Mbps半雙工RS-485收發器     |

## 網路安全

|          |                   |
|----------|-------------------|
| DS28E30  | 1-Wire ECDSA安全認證器 |
| DS28S60  | DeepCover加密輔助處理器  |
| MAXQ1065 | 超低功耗加密控制器         |



瀏覽 [ANALOG.COM/INTELLIGENT-MOTION](https://analog.com/intelligent-motion)