

# 牽引逆變器 - 車輛電氣化背後的驅 動力量



**Audrey Dearien**  
Applications manager  
Isolated gate drivers

**Krunal Maniar**  
Product marketing engineer  
Isolated precision ADCs

**VC Kumar**  
Marketing manager  
Sitara™ processors

**Waqar Mehmood**  
Marketing manager  
C2000™ real-time microcontrollers

# 為混合動力電動車 (HEV) 和電動車 (EV) 精心設計的牽引逆變器，可協助實現更快的馬達速度、更高的效率和更小的系統尺寸，同時維持功率密度。新技術讓汽車製造商能製造出具備更長行駛里程及最佳性能的未來汽車。

## 摘要

深入討論牽引逆變器的設計趨勢和相關的半導體技術和零組件。



### 探索 EV 牽引逆變器的設計趨勢

了解目前啟用高性能、高效率和可靠的牽引逆變器系統的趨勢。

1



### 透過快速電流感測反饋迴圈和高速控制器提高效率

了解電流感測反饋迴圈為何會對車速和性能產生極大的影響。

2



### 開極驅動器及偏壓電源供應如何支援延長 EV 行駛距離

碳化矽 (SiC) 金屬氧化物半導體場效應電晶體 (MOSFET) 和高電壓與正確的零組件搭配使用，可改善 EV 駕駛體驗。

3

## 探索 EV 牽引逆變器的設計趨勢

牽引逆變器將電池電力轉換為控制扭力和速度的功率，對 EV 的行駛距離、性能和行駛體驗影響最大。扭力與馬達尺

寸成正比，而功率提供扭力和速度。如果要縮減馬達尺寸和扭力，並保持功率恆定，則需要加快速度。這是一個難題，因為零組件尺寸通常會隨著功率位準和扭力而增加，在設計效率低的情況尤其如此，例如機械或電力不理想造成的損失。因此不僅要減小馬達的尺寸，還要縮減牽引逆變器本身的電氣系統。

為了在不影響功率位準的情況下擴大行駛距離並縮減馬達尺寸和重量，牽引馬達需要能夠以更高的速度 (>30,000 rpm) 運作。這需要快速感測和處理，以及 DC 到 AC 電壓的高效轉換。為達成這些目標，牽引逆變器設計趨勢將使用先進的控制演算法、功率級的切換電晶體採用 SiC MOSFET、使用高壓 800-V 電池，並整合多個子系統等，以獲得高功率密度。

### 透過快速電流感測反饋迴圈和高速控制器提高效率

改善 EV 駕駛體驗 (包括穩定的巡航控制、回應式加速和減速，以及更安靜的艙內體驗) 的其中一種方法，就是提高電流感測反饋迴圈的整體準確性和可靠性。此控制迴路是一種路徑，該路徑偵測到從牽引逆變器相位輸出的電流、透過隔離式精密放大器返回，再透過微控制器 (MCU) 進行處理。這一旅程最終導致訊號返回到牽引逆變器的控制輸出。最佳化馬達控制迴路可實現快速且精確的回饋，進而讓馬達能對速度或扭矩的變化做出快速反應。圖 1 中醒目標示的部分為馬達控制迴路。

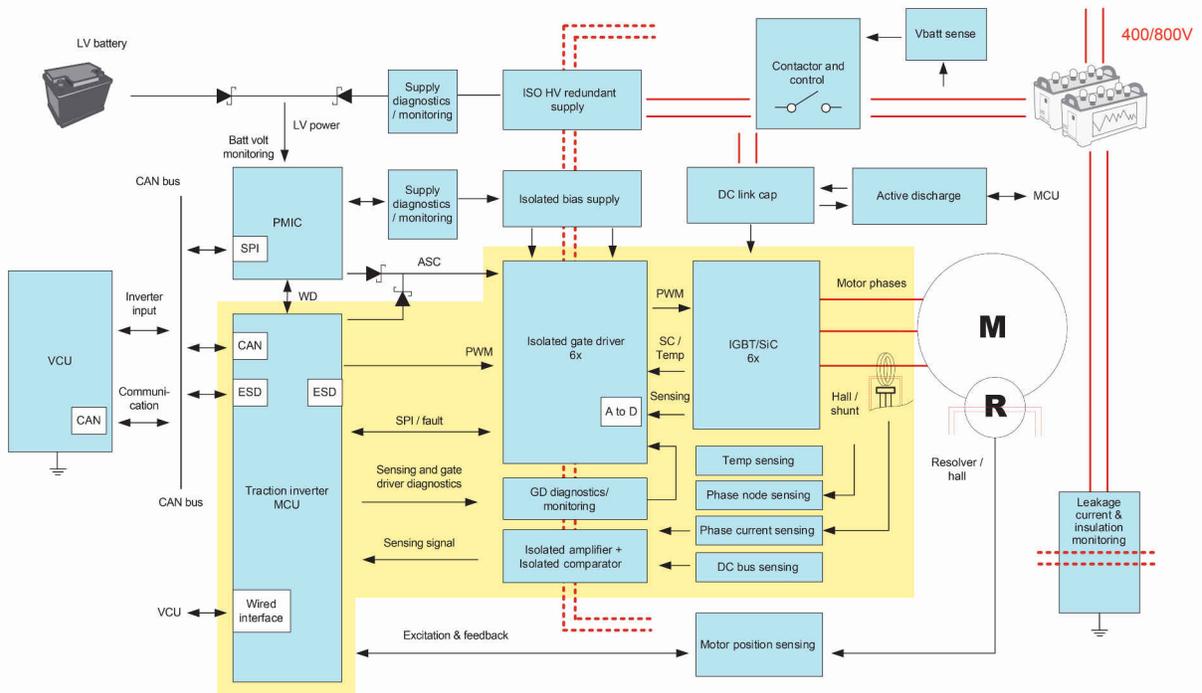


圖 1. 牽引逆變器配置圖中，以黃色醒目標示的部分為馬達控制迴路和功率級。

如圖 2 中所詳述，隔離式半導體零組件通常隔離牽引逆變器中的電源和控制電路。三個隔離放大器或調變器透過分流電阻測量馬達電流，並將訊號饋送到 MCU 的磁場定向控制 (FOC) 演算法。若要加快馬達速度，便需要更高頻寬的電流感測反饋迴圈，這表示同相電流必須儘速產生修改後的轉換器輸出。電流感測反饋迴圈的延遲是首要關鍵，特別是因為功率電晶體的切換頻率 (圖 1 中的絕緣柵雙極電晶體 [IGBT]/SiC MOSFET) 正在提升到數十千赫，並且控制訊號也必須逐週期改變脈衝寬度，以實現高轉速。高電流產生的雜訊也會影響迴路可靠性。

由於隔離放大器鄰近位於雜訊來源，因此其必須可靠運作，電源和控制電路之間的雜訊干擾也需盡可能壓低。因此在電流感測迴路中，必須在電源接地和訊號接地之間提供高瞬態雜訊抗擾度的電流隔離放大器。透過適當的零組件選擇，準確的電流感測迴路可以限制三相電流的諧波失真，進而在加速和煞車條件下支援平穩的馬達速度和扭力控制。電流感測迴路的準確性也有助於防止電氣損耗，並將行駛時的振動降到最低。像 **AMC1300B-Q1** 和 **AMC1311B-Q1** 之類的隔離式放大器，以及像 **AMC1306M25** 和 **AMC1336** 之類的隔離式調變器，都支援準確的電流和電壓量測，頻寬超過 200 kHz，延遲小於

2  $\mu$ s，電流隔離具有超過 100 kV/ $\mu$ s 的共模瞬態抗擾度 (CMTI)。

MCU 必須藉由類比轉數位轉換器 (ADC) 對指定的三相電流量測值進行快速數位化量測，並透過主要演算法為牽引逆變器的輸出產生脈寬調變 (PWM)。馬達控制設計中經常使用的 FOC 演算法需要複雜的數學運算，例如快速傅立葉轉換 (FFT) 和三角運算。這提高了對處理頻寬的需求，尤其是對於 20 kHz 及更高的切換頻率。

分散 MCU 的功率負載非常重要，如此才能處理牽引逆變器的馬達控制和安全功能。高速 FOC 實作為 MCU 內的功率和處理能力提供了更多空餘空間，以處理馬達控制和功能安全特性。像 C2000™ **TMS320F28377D**、**TMS320F28386D**、**TMS320F280039C** 和 Sitara™ **AM2634-Q1** 之類的即時 MCU，可藉由 >3-MSPS ADC 的協助，有效提供快速控制迴路性能，用於感測和處理多個最佳化核心的功率，以快速執行複雜的控制數學運算。用於致動的緊密整合高解析度 PWM 有助於產生精確的工作週期，以最佳化馬達控制。當針對牽引逆變器進行最佳化時，這些階段 (ADC 輸入、FOC 演算法執行和 PWM 寫入) 結合可達到 <4- $\mu$ s 控制迴路延遲。

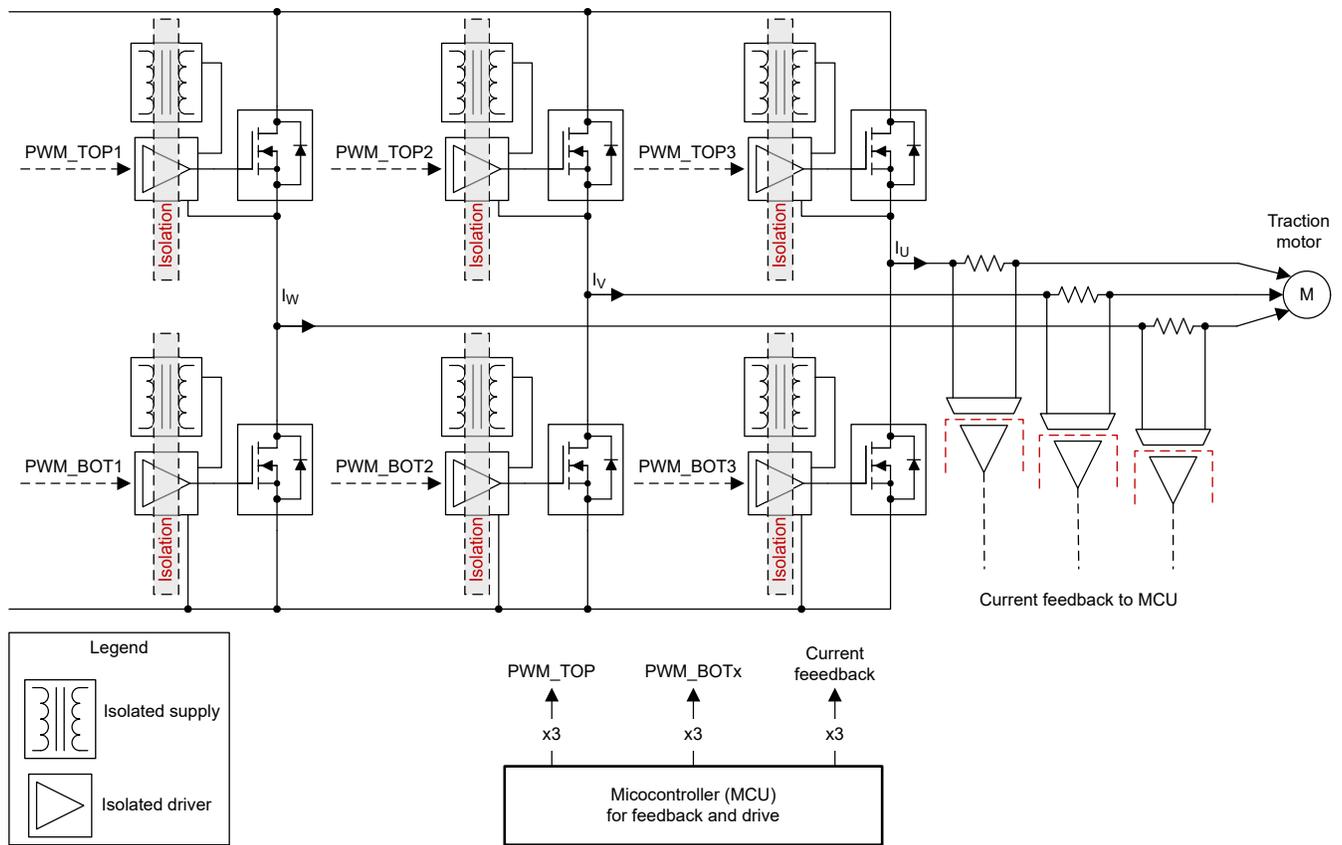


圖 2. 牽引逆變器中的電流感測反饋迴圈。

## 閘極驅動器及偏壓電源供應如何支援延長 EV 行駛距離

MCU 和電流感測迴路產生的控制訊號會被饋送到功率級，而功率級是電池和馬達之間的連結。功率級是由連接三相功率電晶體的大型電容器組去耦的高壓 DC 匯流排所組成，例如 IGBT 或 SiC MOSFET。功率級在將直流電壓轉換為交流電壓時，應具有最小的功率損耗，而且尺寸要小，如此才能有效地使用電池，進而延長車輛的行駛距離。然而這會是一個難題，因為需要較大型的零組件，才能提升電壓和功率。幸好這方面的技術有所突破，能讓零組件在擁有更高功率位準的同時，保有相同尺寸。

有兩大因素會影響牽引逆變器的尺寸，就是高壓電晶體的類型和電池的電壓位準。與具有相同額定電壓的 IGBT 相比，SiC MOSFET 具有更低的切換損耗和更小的晶粒尺寸，所以一些工程師會在牽引逆變器設計中使用 SiC

MOSFET。當 SiC 電晶體獲得適當控制時，會在轉換器運作的所有條件下 (例如溫度、速度和扭力) 以更少的損耗和更高的可靠性運作，加長行駛里程。

雖然 SiC MOSFET 效率更高，但與任何電晶體一樣，會在切換時出現一些功率損耗，而這些切換損耗便會影響到牽引逆變器的效率。切換瞬變期間的電壓和電流邊緣會重疊，並產生功率損耗，如圖 3 所示。高閘極驅動器輸出電流導致 SiC FET 閘極的快速充電和放電，進而實現低功率損耗。然而，鑒於切換行為會隨溫度、電流和電壓而變化，所以以最快的速度切換並不一定最好。跨 SiC FET 的電壓快速轉換，也就是汲極至源極電壓 (VDS) 的瞬態電壓 (dv/dt)，會以傳導接地電流的形式產生電壓過衝和電磁干擾 (EMI)。鑒於線圈之間的電容短路的可能性，馬達本身可能會受到高 dv/dt 的影響。閘極驅動器電路可以控制功率損耗和切換瞬態。

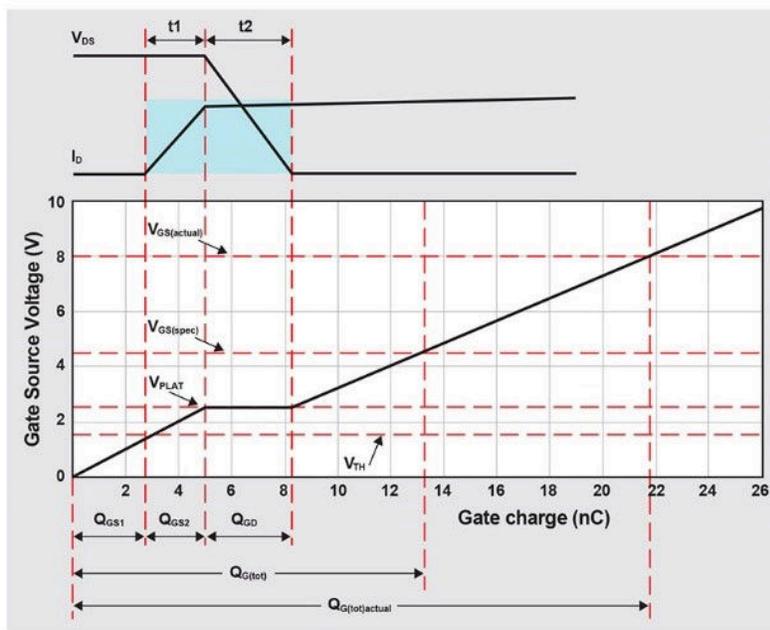


圖 3. MOSFET 的開啟充電模式以及由  $V_{DS}$  和  $I_D$  重疊引起的切換損耗。

使用閘極電阻控制閘極驅動器的輸出源極和汲極電流，有助於最佳化 dv/dt 和功率損耗之間的取捨。圖 4 顯示具有可調整輸出驅動強度的閘極驅動器的實作，可改善跨溫度和電流的 SiC MOSFET 轉換速率變化。

可調性對牽引逆變器的性能有利，因為可以降低 EMI 和損耗，進而提高效率，有助於加長行駛里程。由於 TI 的 **UCC5870-Q1** 和 **UCC5871-Q1** 閘極驅動器具有 30-A 驅

動強度，因此在以改變和最佳化閘極電阻為基礎時，可輕鬆實作可調式閘極驅動解決方案。此外，其電流隔離和 100-kV/ $\mu$ s CMTI 讓使用快速切換 SiC 技術的高壓應用輕鬆簡易。

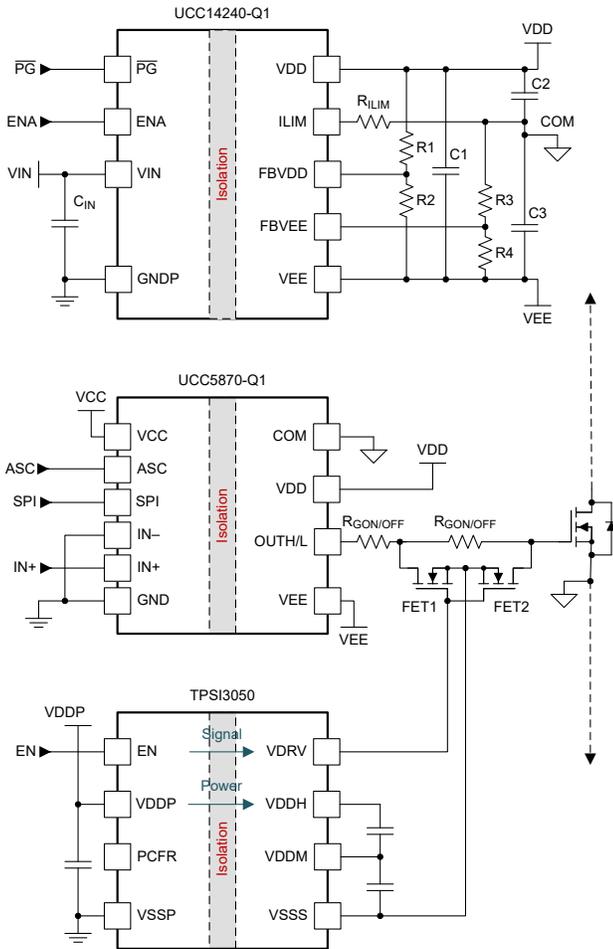


圖 4. 使用由 UCC14240-Q1 供電的 UCC5870-Q1 的可調式開極驅動器輸出電路的配置圖。

電池的電壓位準也會影響系統中存在的  $dv/dt$  量，當設計人員需要將 EMI 降到最低，並選擇能夠符合隔離安全標準，同時保持相同功率密度和面積的零組件時，便會出現一些難題。SiC MOSFET 在小晶粒尺寸中支援  $>1,200\text{ V}$  的高崩潰電壓，進而為  $800\text{-V}$  EV 電池應用提供功率密度高的解決方案。

當電源供應器需要隔離和良好的穩壓時，支援高壓 SiC MOSFET 的開極電壓需求會有所挑戰。從 SiC MOSFET 的電流電壓特性曲線可以看出開極電壓的影響，如圖 5 所示，其中較高的開極至源極電壓 ( $V_{GS}$ ) 導致其線性區域的曲線更陡峭。更陡峭的曲線表示更低的汲極至源極導通電阻 ( $R_{DS(on)}$ )，可將傳導損耗降到最低，並避免熱失控。

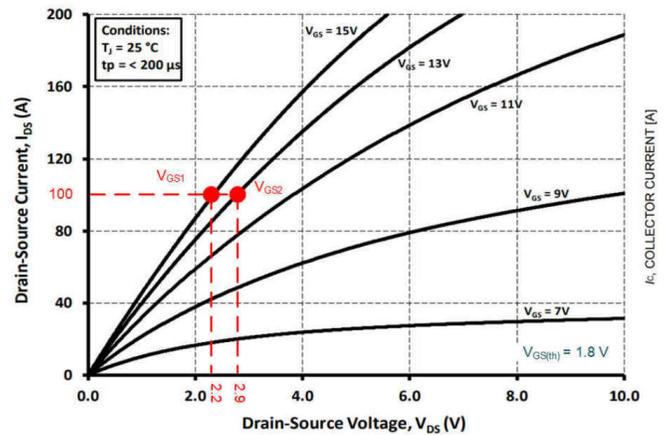


圖 5. 基於  $V_{GS}$  的 SiC MOSFET 電壓及電流特性。

為開極驅動器提供功率和電壓的隔離式偏置電源，應在快速瞬態過程中維持適當的正開極電壓以支援負電壓，使 SiC FET 維持在安全關閉狀態。附帶半導體切換控制器的變壓器通常用於產生隔離電源供應。而其在電氣效率和 EMI 層面的複雜設計，會直接影響功率級的性能。繞組間電容會導致更高的共模電流，進而需要更低電容的 EMI 產生，但在尺寸、額定電壓和效率之間的權衡，則需要更多時間來設計。

有了 UCC14241-Q1 和 UCC1420-Q1 等整合式功率模組，初級到次級隔離電容可以在  $<3.5\text{ pF}$  受到良好控制，進而為快速切換 SiC MOSFET 實現  $>150\text{ V/ns}$  的 CMTI。HEV/EV 子系統設計趨向於進一步整合，例如將牽引逆變器與 DC/DC 轉換器相結合。與具有返馳式轉換器的典型偏壓電源解決方案相比，UCC14241-Q1 的物料清單 (BOM) 面積可縮小約 40%，如圖 6 所示。與分離式變壓器設計相比，高度顯著降低，因而降低了重心，卻提高了震動可耐受度。這些因素都有助於提升牽引逆變器系統的可靠性和使用壽命，同時能提供正確的電壓，以有效率地驅動功率電晶體。

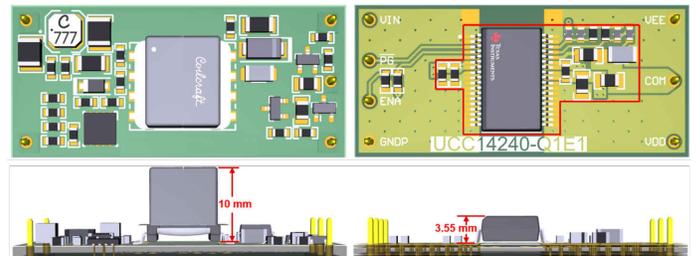


圖 6. 典型返馳式轉換器偏壓解決方案與 UCC14240-Q1 之間的 BOM 面積和高度比較。

## 結論

EV 正在推動從加工處理到功率半導體的全面技術創新。馬達控制和動力系統設計對 EV 的續航里程和駕駛性能有直接的影響。將準確的電流感測器和具有即時控制功能的智慧 MCU 相結合，有助於降低延遲並提升馬達控制迴路的準確度，促成速度和扭矩的平穩轉換。降低諧波失真，提高電效率和駕駛里程；馬達振動也是如此，這有助於避免駕駛的不適感。

採用 SiC MOSFET 和 800-V 技術來啟用牽引逆變器功率密度和效率，就能整合各種動力系統功能，最終提升每次充電的續航里程。TI 提供廣泛的整合式半導體技術組合，讓汽車製造商和第一階 (Tier-1) 供應商能有足夠彈性實現高性能與低成本需求。

進一步了解牽引逆變器技術的相關資訊：

- TI.com 上的 [高壓牽引逆變器](#) 登陸頁面。
- [經 ASIL D 安全概念評估的高速牽引、雙向 DC/DC 轉換參考設計](#)。
- [配備整合式變壓器的汽車 SPI 可編程閘極驅動器和偏壓電源參考設計](#)。

進一步了解牽引逆變器系統的 TI 產品：

- [C2000](#) 即時 MCU。
- [AM2634-Q1](#) Arm® Cortex®-R5F MCU。
- [UCC5870-Q1](#) 進階、可編程的隔離式閘極驅動器。
- 具整合式變壓器的 [UCC14240-Q1](#) DC-DC 模組。
- 德州儀器：[適用於牽引逆變器的 AM263x](#)。
- 德州儀器：[適用於牽引系統的 AM263x 基準和分析](#)。

本文的其他貢獻者包括：

- 系統工程師 Han Zhang
- 產品行銷工程師 Sean Murphy
- 系統工程師 Robert Martinez
- 系統工程師 Dongbin Hou
- 應用工程師 Francisco Lauzurique

**重要聲明：**本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries) in the US and/or elsewhere.  
所有商標均為其各自所有者的財產。

## 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](http://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 © 2022, Texas Instruments Incorporated