

在馬達控制中選擇位置感測器

簡介

馬達中是否仍有位置感測器，因為趨勢是採用「無感測器」？這個問題的完整答案相當複雜，但基本上位置感測器都會繼續保留。在一些應用中，例如電動工具，採用無刷直流電機塊換向或磁場定向控制（FOC）無刷交流電機，無需任何旋轉角度感測器即可運作。但實際情況是，工業和人形機器人、自動行動機器人和線性馬達運輸系統等終端設備絕對需要旋轉角度或線性位置感測器。

使用配備無刷馬達控制的位置感測器

位置感測器不僅用於無刷 DC 或無刷 AC 馬達的定子電流整流，也用於速度和位置控制。工業多軸機器人通常會在馬達軸和機器人軸之間設有齒輪。與馬達軸耦合的旋轉角度感測器不僅需要感測轉子角度，也需要計算馬達軸的圈數，以控制對應機器人軸的等效絕對角度位置。編碼器的類型視應用而定。

增量式與絕對式編碼器

增量式編碼器通常使用 ABZ 數位或類比單向介面，其中兩個正交編碼數位脈衝串訊號（A 和 B）或兩個類比正弦 / 餘弦訊號（A 和 B）可進行解析度約為 10 位元到 28 位元的低延遲相對角度測量。選用的索引（Z 或 I）可提供絕對機械角度資訊。增量式編碼器在啟動時不提供絕對角度，需要轉動最多一圈才能產生索引。因此，這些編碼器非常適合需要極低延遲（ $<1\mu\text{s}$ ）但在啟動時不需要絕對角度的速度可變應用。

相反的，絕對單圈或多圈旋轉編碼器可在啟動時提供絕對角度位置。這兩款產品提供具有供應商特定協議的雙向 RS-485 介面，並可進行時間觸發角度測量，以及旋轉速度和旋轉圈數等資訊。角度解析度通常從 10 位元到 >30 位元，延遲低至 $10\mu\text{s}$ ，可滿足廣泛的工業應用。位置解析度通常是透過數位介面傳輸的資料格式。例如，具有 20 位元整數格式的角度的解析度為 $360/2^{20}$ ； $0\text{h} = 0$ 度， $0\text{xFFFFFF} = 360$ 度 $-360/2^{20}$ 。整體系統雜訊明顯高於量化雜訊；有效位元數（ENOB）可說明此影響的特性。

方程式 1 使用以度為單位的角度標準偏差計算角度的 ENOB：

$$\text{ENOB} [\text{bit}] = (20 \cdot \log_{10}(360/\text{stdev}(\text{angle})) - 1.76)/6.02 \quad (1)$$

角度雜訊訊號的均方根等於標準差（1 sigma）。**圖 1** 說明角度準確度；相關角度誤差大於標準差。角度精度不僅取決於峰值雜訊（通常使用 6-sigma 值），也取決於一圈內的非線性。

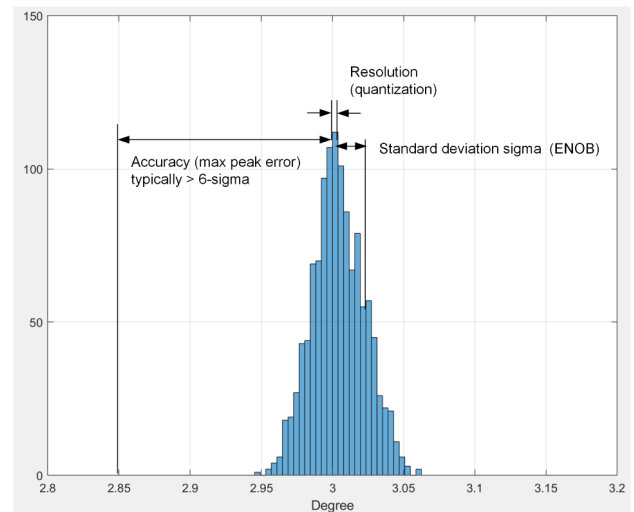


圖 1. 靜態角度分布。

FOC 馬達控制技術和編碼器要求

圖 2 中顯示的 FOC 方法是一種高性能技術，可根據轉子磁通量角度控制產生的定子電流向量，以將永磁同步馬達的扭矩最大化。FOC 可實現從靜止到高速運作的平穩扭矩和快速暫態響應。準確且低延遲的轉子磁場角度測量會將三個定子相位電流（ i_U 、 i_V 和 i_W ）分解為轉子磁場導向座標系統， i_q 等於扭矩產生電流，並且 i_d 等於削弱磁場電流。

在人形機器人等終端設備中，測量絕對旋轉角度的精度通常為 1 度至 0.1 度，ENOB 為 12 位元至 15 位元，取樣率為 8kHz 至 32kHz。旋轉角度與馬達相位電流同時感測。低延遲角度測量（ $<20\mu\text{s}$ ）為微控制器（MCU）提供了足夠的時間來運行控制演算法，並更新脈衝寬度調變器（PWM）以進行下一個 PWM 週期。

可以將旋轉角度感測器整合到馬達外殼中，就像大多數人形機器人一樣，也可以整合在獨立外殼中，以安裝在馬達軸上。這兩種情況都需要在高溫下運作 – 通常在高達 125C 的環境溫度下。在人形機器人中，控制 MCU 位於旋轉編碼器附近，TI 的 TMAG6180-Q1 異向性磁阻 (AMR) 感測器等 360 度角度感測器可提供符合成本效益且低延遲的介面。

與旋轉馬達不同，線性馬達架構運輸系統需要絕對線性位置感測，但仍會施加 FOC 以獲得最大扭矩。12 位元位置解析度和 <100µs 延遲通常就足夠了。

此外，如要在工業機械中實現國際電工技術委員會 62061 或國際標準化組織 (ISO) 13849 功能安全，需要由安全完整性等級或性能等級決定的安全認證編碼器，以及使用位置感測器進行額外診斷，以偵測隨機硬體故障。在汽車應用中，依 ISO 26262 設計的系統會在系統啟動時執行診斷，而工業系統則需在正常運作期間持續診斷，因為這些系統通常全天候 24 小時運作。

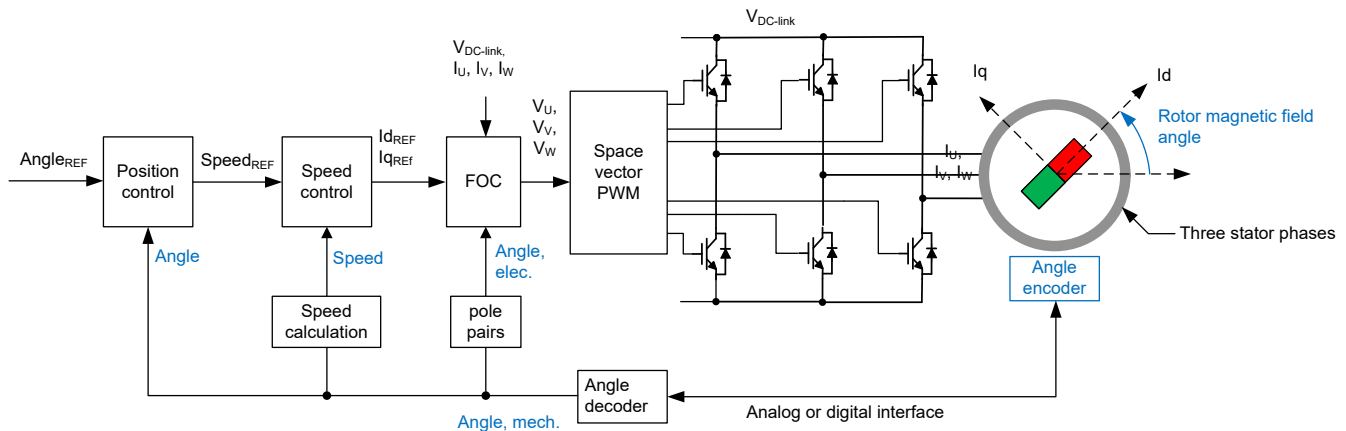


圖 2. 串連位置、速度和 FOC。

位置感測器技術

位置感測器的主流類型為光學、磁性、電感或電容式。光學感測器通常可提供最高解析度（雖然磁性與電感感測器較可靠），並可能提供較低的總系統成本。在工業或汽車系統中，由於附近配線中有大量電流流動，因此需採用感測器技術，例如不受磁性雜散場影響的電感器技術。電容感測器的解析度通常低於電感感測器和磁性感測器，也不常見。

針對嚴苛環境中的成本導向系統（例如馬達整合所造成的高溫），TI 提供磁性與電感式位置感測器。

磁性位置感測器

磁性編碼器能以符合成本效益的方式偵測旋轉或線性動作，同時在可能包括灰塵、油和水在內的嚴苛環境中提供耐受性。磁性位置感測器會偵測磁場變化，轉換為電子訊號，並產生輸出訊號。磁性位置感測器技術有多種多樣，

包括霍爾效應、AMR、隧道磁阻 (TMR) 和巨型磁阻 (GMR)。表 1 列出每個感測器的優缺點。

參數	霍爾效應 (無磁通量集中器)	霍爾效應 (含磁通量集中器)	AMR	GMR	TMR
操作區域	-	-	飽和度	飽和度	飽和度
成本	最便宜的	> 霍爾	> 霍爾	> 霍爾和 AMR	最貴的
角度測量	XYZ	XYZ	XY	XY	XY
角度範圍 (度)	0-360	0-360	0-180 (TMAG6 180-Q1 擴展到 360)	0-360	0-360
延遲	高等	高等	低等	低等	低等
角度誤差 (度)	<1.2 1	<1 1	<0.6 1	>1 2	<0.6 2

參數	霍爾效應 (無磁通量集中器)	霍爾效應 (含磁通量集中器)	AMR	GMR	TMR
磁通量密度範圍 (限制磁氣隙距離) (單位為毫特斯拉)	0-300	0-70	>20-無限制 (TMAG6 180-Q1 可耐受高達 1,000)	20-120	20-120

表 1. 磁性感測器技術比較：主要功能與規格。

1. 增益和偏移校準後。
2. 增益、偏移和正交校準後

3D 霍爾效應線性感測器的線性位置感測

在具有快速移動有效負載載波以 5m/s 至 15m/s 的線性馬達運輸系統中，12 位元位置解析度、延遲 <100µs 和取樣

率 ≤8kHz 通常已足夠，而多個位置感測器則可透過高速序列周邊介面 (SPI) 匯流排連接至單一 MCU，如圖 3 所示。

TMAG5170 3D 霍爾效應感測器具備三個主要優勢 – 精確度、低延遲和電路板配置彈性。完整溫度範圍中的靈敏度誤差漂移小於 2.8%。10MHz SPI 可提供低延遲。此外，板載 3D 感測元件可實現可配置的 XY、YZ 或 XZ 感測方向，提高將感測器放置在與磁鐵相關的靈活性。

具有四路 3D 霍爾效應感測器的精確低延遲線性位置感測參考設計使用間隔為 25mm 的 **TMAG5170**，進行精確、低延遲的線性位置感測。C2000™ MCU 以取樣率 ≥8kHz 讀取來自四個 TMAG5170 感測器的磁性 Z 和 X 場資料，並以誤差 <0.15mm 和延遲 <57.5µs 計算移動磁體位置。

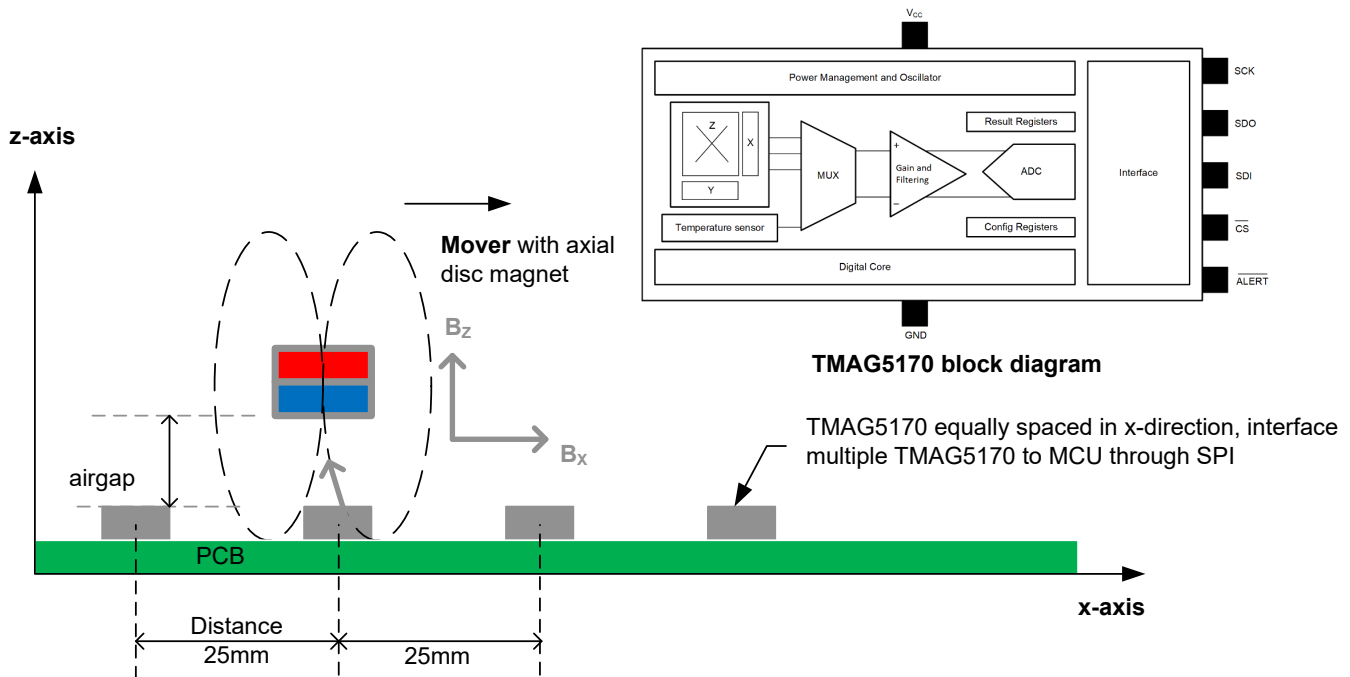


圖 3. 線性馬達運輸系統中的 TMAG5170。

AMR 感測器的旋轉角度範例

AMR 感測器包含四個磁電阻電橋，其中兩橋輸出端子的電壓差將反映外部磁場幅度。

相較於霍爾效應感測器，AMR 感測器的頻率操作及訊號雜訊比 (SNR) 較高。與 GMR 和 TMR 感測器相比，AMR 感測器的正交誤差相對可忽略。在伺服驅動等需要高

準確度編碼器的應用中，AMR 感測器通常較為理想，因為其磁場公差較高，整體抗擾性也較佳。

TMAG6180-Q1 2D AMR 角度感測器可測量磁場，並產生與這些磁場成正比的兩個差動 (或單端) 電壓輸出。TMAG6180-Q1 的 <2µs 延遲也可將高速移動所造成的角度誤差降到最低。整合式霍爾效應開關可產生兩個數位象

限輸出 (Q0 和 Q1)，因而將角度偵測範圍延伸至 360 度。在與正弦和餘弦波形配合下，Q0 和 Q1 數位輸出就足以決定絕對旋轉角度。圖 4 為 TMAG6180-Q1 的功能配置圖，同時圖 5 顯示輸出波形。

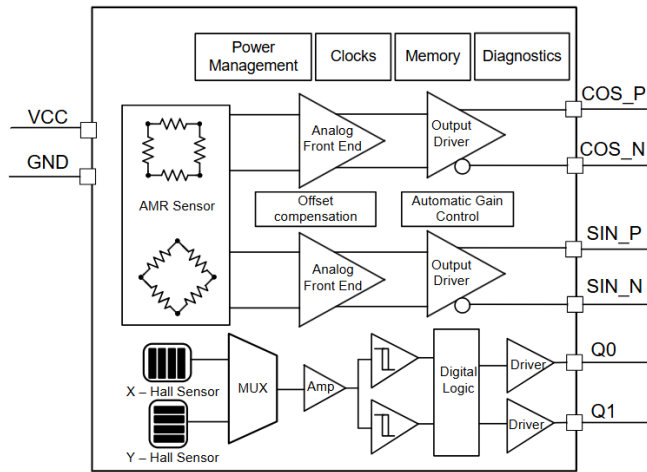


圖 4. TMAG6180-Q1 方塊圖。

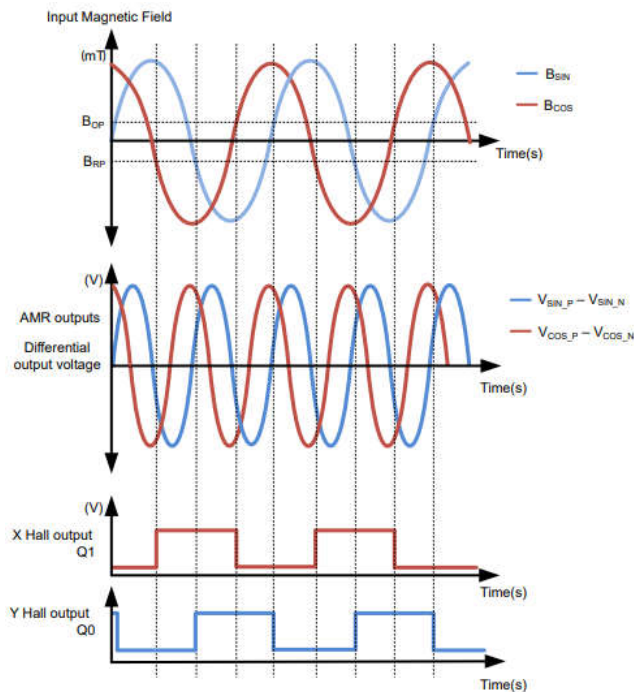


圖 5. TMAG6180-Q1 輸出波形。

為獲得更佳準確度，MCU 應整合高速、高 ENOB 類比轉數位轉換器，並能執行有限脈衝反應濾波器等數位濾波器

以消除訊號雜訊，並且具備額外補償演算法以消除機械公差和訊號鏈增益與偏移不相符所造成的誤差。配備 AMR 感測器的高解析度、低延遲、精巧型絕對角度編碼器參考設計是一款搭載 TMAG6180-Q1 和 MSPM0G3507 MCU 的小型 (直徑 3 公分) 參考設計，配備整合式雙 12 位元 ADC (最高 128 倍過取樣) 和數學加速器，有助於提高效率並降低系統成本。該系統實現了相當於 15.4 ENOB 的 94.7dB SNR 和低於 0.05° 的角度測量，如圖 6 中所示。

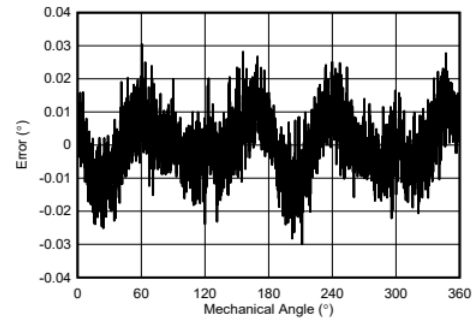


圖 6. 旋轉一圈時的角誤差，偏移校準為 25°C。

電感式位置感測

電感角度感測器比磁性感測器具有更多的優勢。其主要優點是對外部 DC 磁場的固有磁性抗擾性。此外，電感技術只需將導電金屬目標 (且無磁鐵) 靠近感應線圈，即可在金屬目標繞軸旋轉時判斷其位置。

圖 7 說明了使用兩個 LDC5072-Q1 電感感測器的絕對編碼器，每個感測線圈一個。非 IUS 編碼需要兩個感測線圈：外部感測器目標可能有 16 個金屬位置；內部目標，15 個。兩個目標間距均勻，可在整個旋轉過程中形成獨特圖案，從而提供瞭高精度地了解絕對角度的能力。

機械解析器的功能與絕對電感編碼器相同，但在尺寸和重量方面都有缺點。您可直接在印刷電路板上建置電感編碼解決方案，而解析器則建置在厚鋼板上，具有銅線繞齒。解析器的機械結構也很昂貴。最後，功耗可能是個問題，因為解析器容易消耗 500mW 的功率 (假設 70mA 為 7V_{RMS})。

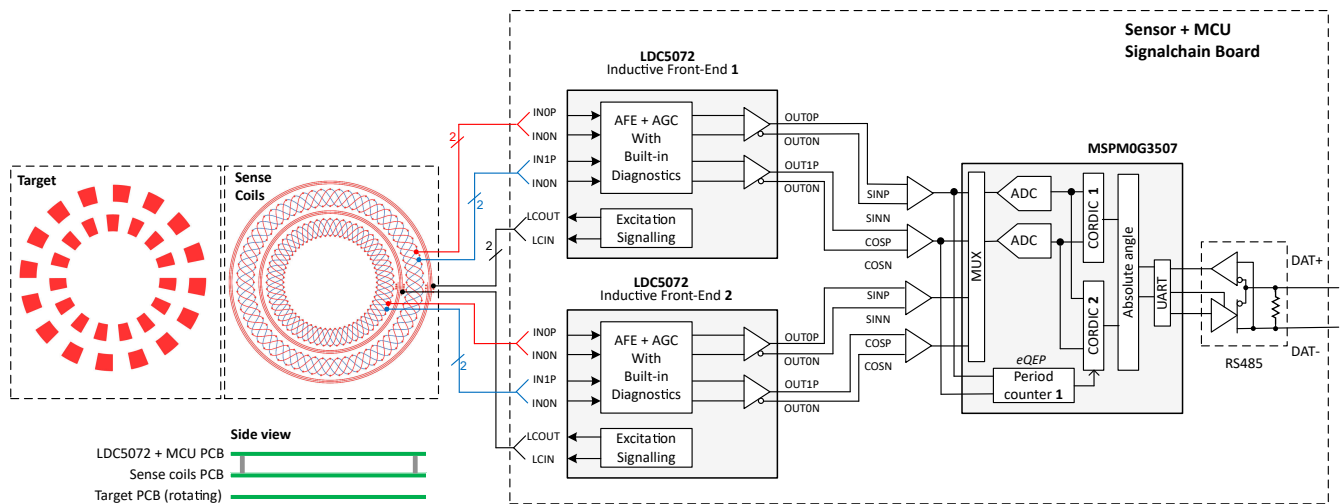


圖 7. 含 LDC5072-Q1 的絕對編碼器。

結論

選擇最適當的位置感測器需視馬達驅動系統需求而定，成本、性能、操作溫度與尺寸是最重要的取捨考量。另一個面向是為工業或汽車解決方案增加額外診斷或功能安全。每種馬達和編碼器類型都有自己的需求，因此選擇最適合應用的感測器類型非常重要。

其他資源

- 閱讀應用簡介 [人形機器人中的馬達控制](#)。
- 查看 [採用霍爾效應感測器的絕對角度編碼器參考設計](#)，實現精確的馬達位置控制。

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。

C2000™ is a trademark of Texas Instruments.
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](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