

# 設計 4mA 至 20mA 迴路供電發送器

Ahmed Noeman  
System Engineer  
SEM FAC, Freising

## 簡介

在任何製程控制系統中，感測器發送器會整理從壓力和溫度到流量和位準的資料，並將這些資訊傳遞到可編程邏輯控制器 (PLC) 或分散式控制系統。

這些發送器依賴 4mA 至 20mA 訊號將資料傳輸至控制器。儘管有 IO-Link 和 Profibus 等標準的出現，4mA 至 20mA 仍可在長距離下提供彈性、可靠性、抗雜訊性，以及與每個 PLC 系統的通用相容性。

在本文中，我將概述 4mA 至 20mA 發送器結構、其運作原理以及使用半導體型錄產品實作此發送器類型的替代設計。

## 4mA 至 20mA 發送器基礎知識

4mA 至 20mA 發送器根據電源和電線數量分為四線、三線和雙線。我將在本文中重點介紹雙線類型。

透過連接電場電源和類比輸入模組，**圖 1** 中的雙線現場發送器形成電流迴路。現場發送器中的第一個子系統為感測子系統，其連接至實體感測器，調整輸出，然後將訊號轉換為數位程式碼以進線性化與校正等處理。第二個子系統為傳輸子系統，其從迴路中擷取電力為發送器供電，並將數位訊號轉換回類比訊號以傳送處理資料，並控制迴路電流。發送器透過在迴路中調節電流來傳輸訊號，並作為電壓受控的電流來源。

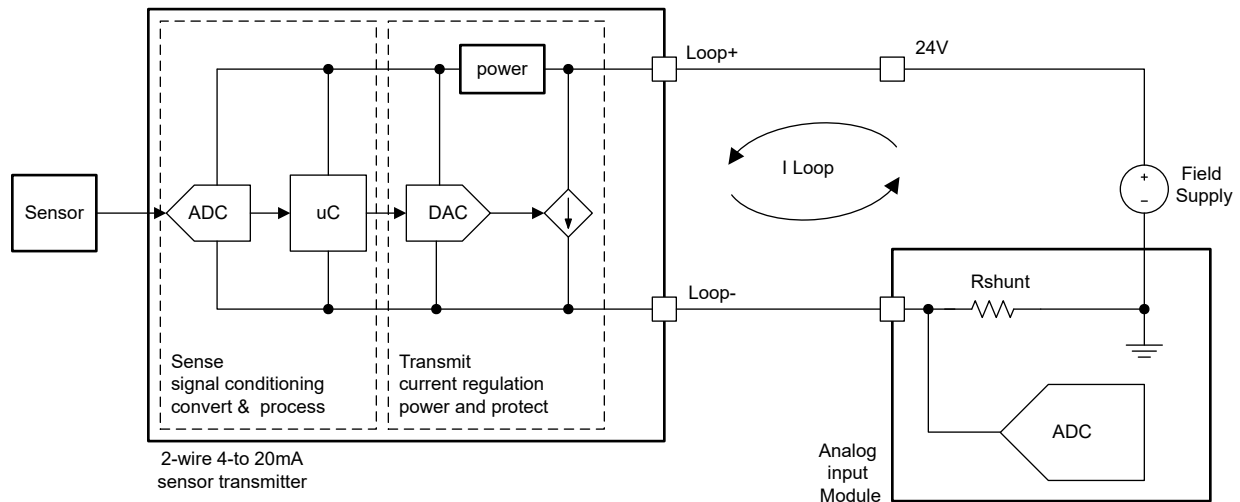


圖 1. 通用雙線 4mA 至 20mA 感測器發送器。

在 **圖 2** 中，N 通道 P 通道 N 通道 (NPN) 電晶體汲取並調節電流，其基極透過由數位轉類比轉換器 (DAC) 驅動的放大器進行控制。大範圍輸入電壓低壓降 (LDO) 穩壓器可將迴路電壓降至發送器的供電位準，來為不同元件供電。如果 DAC 沒有整合式參考可使用電壓參考，而啟用高速可尋址遠程傳感器 (HART) 的發送器需要 HART 數據機。

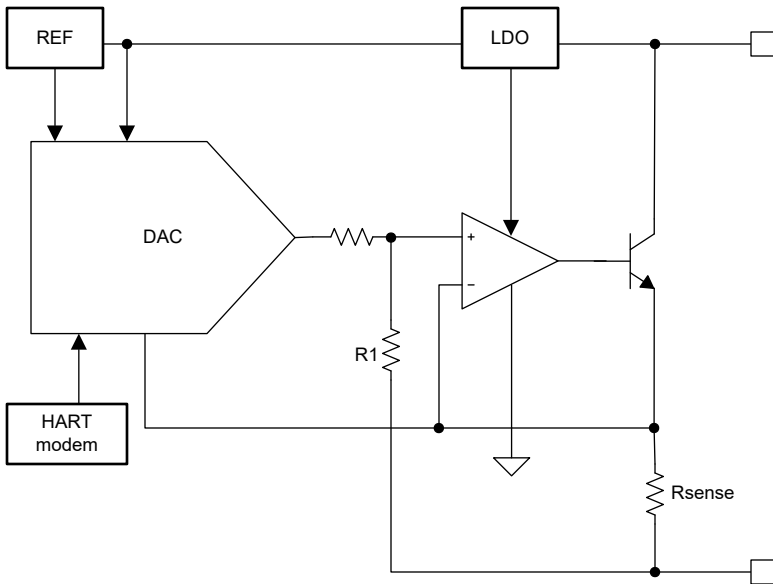


圖 2. 雙線 4mA 至 20mA 發送器電路。

運作原理非常簡單：將運算放大器的兩個輸入保持在虛擬本地接地。無論 R1 具有什麼電壓，Rsense 也有。藉由適當的調整，Rsense 帶有經調節的 R1 電流。鑑於 Rsense 電流幾乎是現場發送器全部的電流 (甚至涵蓋 圖 2 未描述到的感測部分)，DAC 輸出控制了整個發送器電流。NPN 電晶體和放大器迴路繞過必要的電流，以補充發送器本身使用的任何電流，藉此達到所需的輸出電流。

### 4mA 至 20mA 發送器設計面向

4mA 至 20mA 發送器設計考量因素有：

- 低功耗運作。
- 體積小巧。
- 整個工業用溫度範圍均維持準確度和低雜訊。
- HART 通訊協定支援。
- 低成本。

### 設計性能指標

發送器性能指標有幾項需要評估：

**迴路合規電壓**是發送器正常運作的迴路電壓範圍。主要由 LDO 限制決定，並受保護裝置等迴路內的串聯元件影響。典型迴路遵循電壓範圍為 12V 至 36V。

**解析度**是發送器可以產生並直接連結至 DAC 原生解析度的不同電流輸出值的數量。商業 4mA 至 20mA 發送器的解析度介於 12 位元至 16 位元之間。

**線性誤差**主要由 DAC 的積分非線性決定，也是整個輸出範圍中的最大誤差 (以最低有效位元 [LSB] 為單位)。

**雜訊**是以輸出雜訊電流的均方根 (RMS) 測量而得。這種雜訊會使部分輸出位準難以區分，而降低有效解析度。在本情況下，有效解析度是對雜訊性能的測量。對於 16 位解析度系統，有效解析度預期在 13 位元和 15 位元之間，視訊號頻寬而定。

**準確度**會測量電流輸出與理想電流值的偏差。這包括偏移誤差、增益誤差及非線性誤差的 RMS 總和，再加上這些數值的溫度漂移。未調整的總誤差表示不準確的程度。

**動態性能**包括訊號頻寬和發送器穩定性。頻寬是指可在迴路上傳輸的最大電流訊號頻寬。此頻寬是由 DAC 安定時間和放大器電路頻寬，以及旁路電晶體的轉導決定。使用退化電阻器可消除對電晶體轉導 ( $g_m$ ) 變化的依賴。放大器電路通常也會在外部補償。穩定性與迴路的頻寬和補償電容器值有關。減少迴路關鍵節點上的電容可確保穩定性。如需迴路穩定性及其需求的詳細分析，請參閱 [DAC161S997 產品規格表](#)。如果發送器支援 HART，減少外部元件的頻寬有助於防止 HART 訊號干擾。

**電路保護**會保護發送器不發生反向迴路極性和突波事件等異常情況。反向極性由二極體阻斷。如果以反向極性操作發送器，請使用整流器電橋，如 圖 3 所示。突波防護需要暫態電壓抑制二極體 (例如 [TVS3301](#)) 和被動元件來限制高電壓事件期間的電流。這類保護元件在運作過程中需要一些空餘空間，並會增加最低合規電壓。

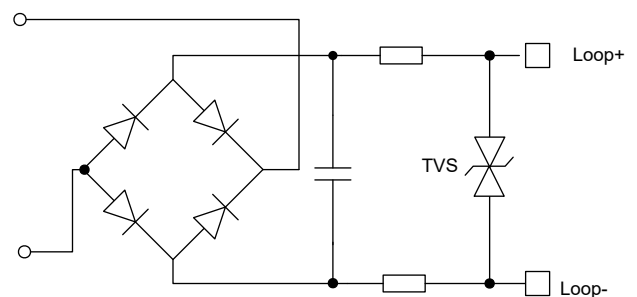


圖 3. 雙線發送器的典型防護部分。

### 發送器電路實作

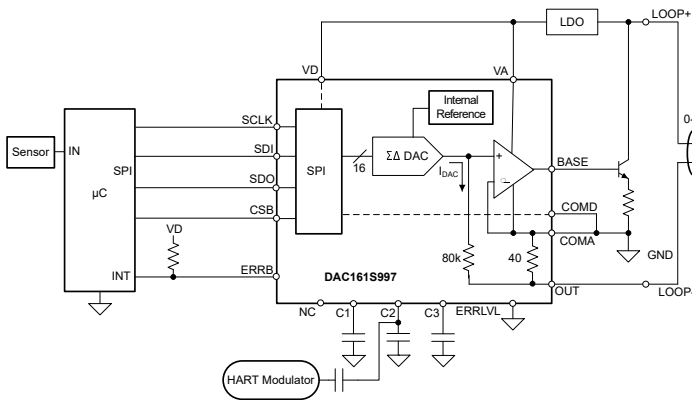
圖 2 中原理圖實作之間的差別在於整合方法。旁路電晶體一律為分離式元件，可增進熱管理。藉由加入像是

**DAC8740H** 的 HART 數據機，以下所有實作均可支援 HART 通訊協定。

### 專屬迴路轉換器

其中一種方法是將 **DAC161S997 產品規格書** 等 DAC 與整合式電壓參考與輸出放大器搭配使用。此解決方案由 DAC、寬輸入電壓 LDO 和 NPN 電晶體組成，如 **圖 4** 所示。此實作具有 130 $\mu$ A 電流消耗和優異的精準度，無需校正。**DAC161S997** 具有診斷功能，可在低電源或高電流負載情況下偵測電流迴路錯誤，並傳送低於 4mA 的錯誤低電流訊號。

此設計十分簡單，少數外部零組件即可確保迴路穩定性並限制突波電流。這種方法的最高操作溫度為 105°C。

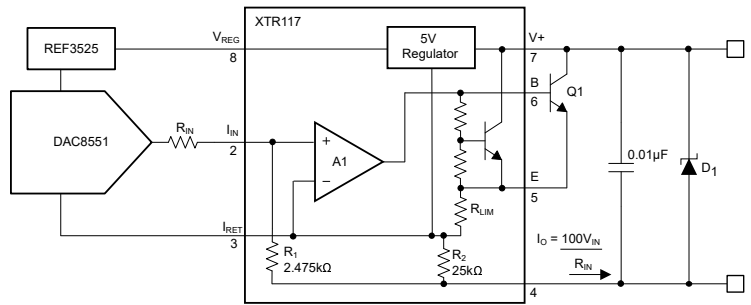


**圖 4.** 使用 **DAC161S997** 的雙線 4mA 至 20mA 發送器。

### 迴路發送器裝置

另一種實作使用 **DAC8551** 等低功耗 DAC，然後使用 **XTR115** 等專屬迴路發送器，搭配整合式 LDO、電壓參考和輸出放大器。這種方法可將雜訊降至最低，增益誤差低於 1%。

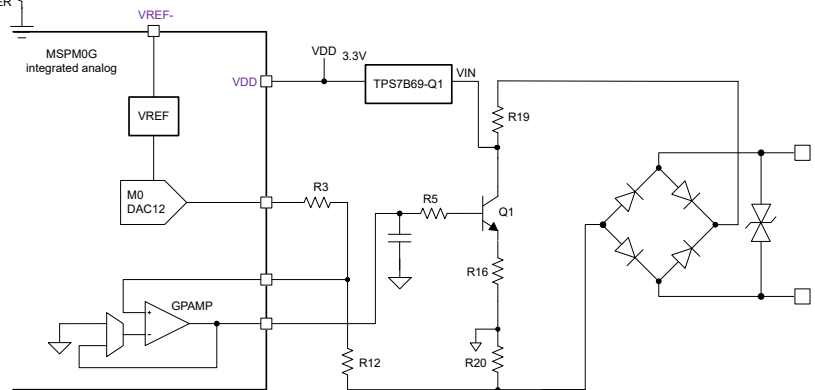
不過有一些限制：**XTR115** 操作溫度限制在 85°C，整合式 LDO 最高輸入為 36V。作為替代品，**XTR117** 採用更小的封裝，靜態電流消耗量更低，並可在高達 125°C 的溫度下運作。**XTR117** 的整合式 LDO 運作電壓高達 40V。**XTR117** 不會整合電壓參考，所以加上外部參考的話，此解決方案成為三裝置解決方案：LDO、DAC 和電壓參考，如 **圖 5** 所示。



**圖 5.** 使用 **XTR117** 的雙線 4mA 至 20mA 發送器。

### MCU 整合式 DAC

具成本效益的應用可採用有類比資源的 MCU。MSPM0G MCU 可做到發送器階段實作，包括整合式 12 位元 DAC、內部參考和輸出放大器。LDO 是唯一需要的外部設備，如 **圖 6** 所示。由於是在 MCU 的數位程序上實作類比功能，因此比起其專屬類比裝置，這些裝置的耗電量相對較高。對於需要以超低成本達到 11 位元有效解析度的應用而言，此方法非常具有吸引力。若使用 **VREF-** 針腳作為內部參考負極針腳，而不是接地接腳，便可改善性能。分離 **VREF-** 針腳可從類比參考中隔離出數位雜訊。



**圖 6.** 使用 **MSPM0G** 實作的雙線 4mA 至 20mA 發送器。

### PWM 型 DAC

較常見的 MCU (無整合式 DAC) 使用方法是依靠脈衝寬度調變 (PWM) 產生 DAC 輸出。簡易 PWM DAC 的解析度為 10 位元至 12 位元。不過也可利用更先進的技術，如雙路徑 PWM 及主動漣波抑制，來實現 16 位元解析度 DAC。為了達到高有效解析度，會使用電壓參考供電邏輯閘來緩衝 PWM 訊號；MCU 需要適當的旁路，以避免數位雜訊注入迴路電流。**圖 7** 中描述的實作為低功率，在不同溫度下

具穩定性，並能以極低成本達到超過 13 位元的有效解析度。

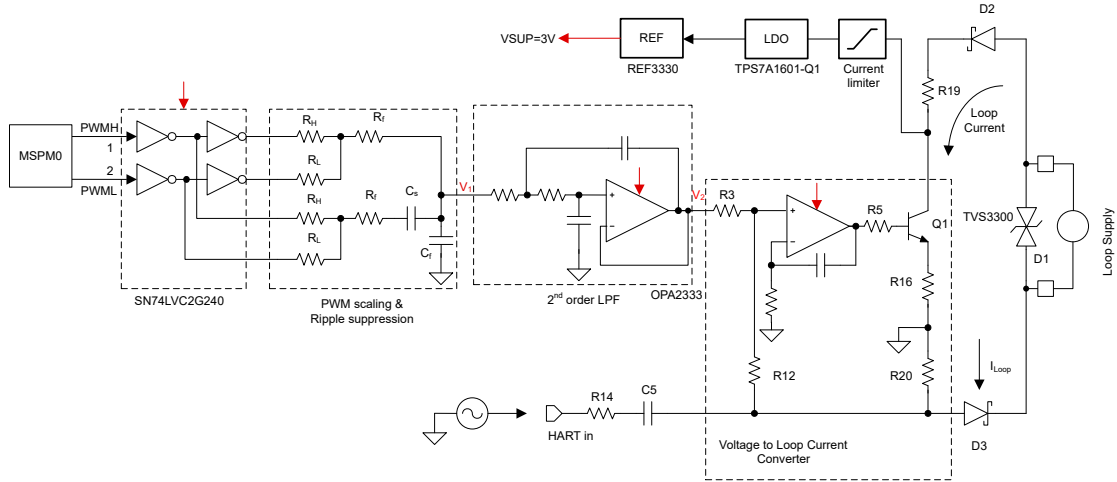


圖 7. 使用 PWM DAC 實作的雙線 4mA 至 20mA 發送器。

### 獨立式低功耗 DAC

使用低功耗獨立式 DAC 來實現 圖 8 中的 AFE88101 等 4mA 至 20mA 發送器，可獲得最佳解析度和線性性能。為了進一步降低功率，REF35125 等低功率電壓參考可以將電流降至 180µA。此外，AFE88101 還具備豐富的診斷功能，包括 12 位元 ADC 與定義的容錯模式。

AFE881H1 與 AFE88101 針腳對針腳相容，並具有精巧型支援 HART 發送器適用的整合式 HART 數據機。若啟用 HART，AFE881H1 的電流消耗較低。HART 數據機在運作期間一般消耗 10µA，使其成為低功耗、支援 HART 發送器的首選裝置。AFE88101 的另一項功能是與 1.8V 邏輯的相容性，可允許低電壓數位運作，進一步降低 MCU 輸入/輸出側的功率，並減少電磁放射。

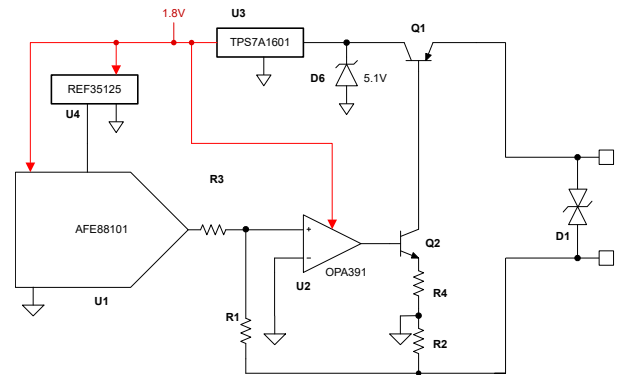
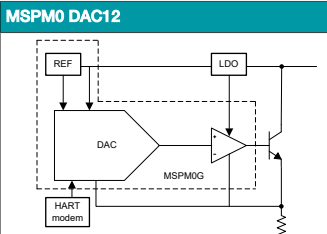
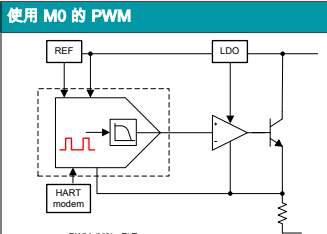
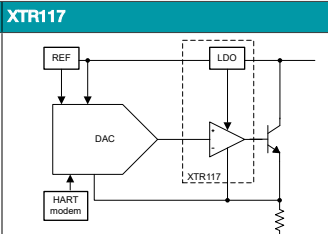


圖 8. 使用 AFE88101 實作的雙線 4mA 至 20mA 發送器。

是以 130µA 執行 DAC8311 DAC、LDO 和外部參考，而仍有相當程度性能的低成本版。

### 實作比較

表 1 和 表 2 顯示每項實作、建議的物料清單 (BOM) 及預期性能。性能數據是根據有限測量結果而得。

	MSPM0 DAC12	使用 M0 的 PWM	XTR117
			
BOM	MSPM0G、TPS7B69、DAC8740H	TPS7A1601、REF3330、TLV2333、DAC8740H	XTR117、DAC8551A、REF3525
合規 (伏特)	40	60	40

	MSPM0 DAC12	使用 M0 的 PWM	XTR117
解析度 (位元)	12	16	16
線性 (LSB)	2	<6	8
有效解析度 (位元)	11	13.4	14
精度	1% 全刻度, 6 $\mu$ A	1% 全刻度, 6 $\mu$ A	0.7% 全刻度, 20 $\mu$ A
電流 ( $\mu$ A)	425	240	440
溫度 ( $^{\circ}$ C)	125	125	105
競爭優勢	低成本	低成本、高解析度、低功耗	高解析度

表 1. 4mA 至 20mA 發送器的設計選項、建議的 BOM 和性能 (MSPM0 DAC12、使用 M0 的 PWM、XTR117)。

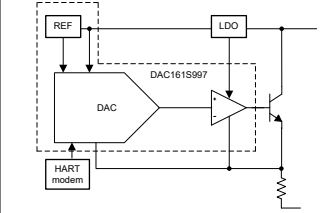
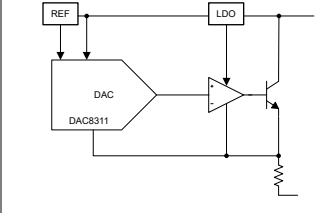
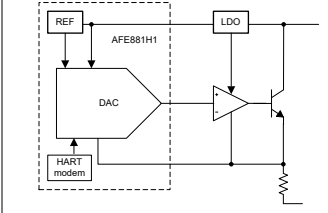
	DAC161S997	DAC8311	AFE881H1
			
BOM	DAC161S997、TPS7A1601、DAC8740H (1)	DAC8311、REF3525、OPA391、TPS7B69、DAC8740H	AFE88101 (1)、REF35125、OPA391、TPS7A1601
合規 (伏特)	60V	40	60
解析度 (位元)	16	14	16
線性 (LSB)	5	4	4
有效解析度 (位元)	13.4	13.4	16
精度	0.01% · 1 $\mu$ A	0.15%	0.07%
電流 ( $\mu$ A)	130	130	180 (240w/intREF)
溫度 ( $^{\circ}$ C)	105	125	125
合規 (伏特)	超低功耗、高解析度、高準確度	超低功耗、低成本	高解析度和高準確度、低功耗、低電壓

表 2. 4mA 至 20mA 發送器的設計選項、建議的 BOM 和性能 (DAC161S997、DAC8311、AFE881H1)。

(1) DAC8740 的最高斷電電流為 180 $\mu$ A，在使用晶體振盪器啟動時則約為 300 $\mu$ A。但 AFE881H1 HART 數據機平均會消耗 10 $\mu$ A。如果啟用 HART，需新增對應的電流。

## 結論

此選擇程序可協助您在設計 4mA 至 20mA 發送器時決定正確的實作：

- 若您要打造安全系統，且需要最高精度和最低雜訊性能，或是尋求功耗低於 200 $\mu$ A 且支援 HART 的發送器，**AFE88101** 和 **AFE881H1** 是您的首選。
- **DAC161S997** 實作提供最低的功耗和佔用空間，其次是 **DAC8311** 實作，而如果比起功耗更注重性能，則可選擇 **XTR117** 實作。

- 若想花費最低的成本，請選擇 **MSPM0G** 實作。如果不滿意其性能，下一個成本最佳化的解決方案是 **PWM** 解決方案。

## 相關網站

- [4-20mA 電流迴路發送器參考設計](#)
- [採用單電流迴路和 FSK 調變的雙路感測器量測參考設計](#)
- [通過 EMC/EMI 測試的雙線 4-20mA 發送器參考設計](#)
- [現場發送器適用的高性能 16 位元 PWM 到 4 至 20mA DAC](#)
- [設計現場發送器適用的高性能 PWM DAC](#)
- [使用 AFE881H1 的超低功耗、低電壓雙線 4 至 20mA 迴路發送器](#)
- [配備 HART 數據機的高精度迴路供電 4mA 至 20mA 現場發送器參考設計](#)

**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。

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 © 2024, Texas Instruments Incorporated