

Analog Engineer's Circuit

DAC80501 および XTR200 を使用した高精度、3 線式アナログ電流出力トランスマッタ



設計目標

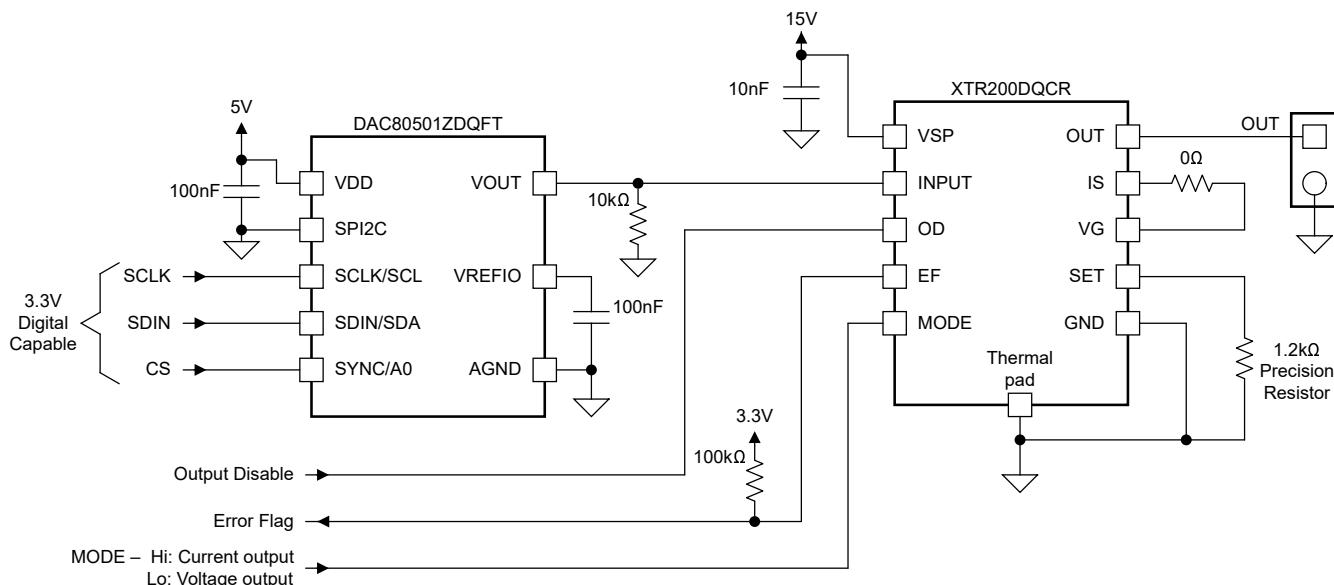
キー入力パラメータ	キー出力信号	推奨デバイス
DAC 出力電圧 動作範囲: 0V ~ 2.4V フルスケールレンジ: 0V ~ 2.5V	XTR 出力電流 動作範囲: 0mA ~ 20mA フルスケールレンジ: 0mA ~ 20.833mA	DAC80501、XTR200

目標

トランスマッタ (XTR) デバイスを使用して、高精度の D/A コンバータ (DAC) 出力から、0mA ~ 20mA のアナログ電流出力を生成します。より大きなフルスケール レンジ設定が出力に組み込まれており、必要に応じてキャリブレーションできます。

設計の説明

この回路では、DAC80501 の電圧出力が XTR200 を駆動して、高精度アナログ電流出力を 0mA ~ 20mA の動作範囲に設定し、キャリブレーションのためにフルスケール レンジを 20.833mA まで拡大します。XTR200 は高精度の 1.2kΩ 抵抗を使用して、電流範囲を正確に設定します。この回路は、DAC80502-01EVM と XTR200EVM を使用して構築・テストされたものです。XTR200 には、電流または電圧のいずれかを出力するピン選択可能なモードがあります。以下の回路は電流出力として記述されていますが、回路図を変更せずに電圧出力として構成することもできます。このシンプルな回路は、アクチュエータやプログラマブル ロジック コントローラ (PLC) などのアナログ出力の産業用オートメーションやプロセス制御に使用されます。



仕様

DAC80501 出力	XTR200 MODE ピン	XTR200 出力	精度
0V ~ 2.5V	Hi (電流出力)	0mA ~ 20.833mA	±0.2%

デザイン ノート

- この例の回路は、SPI 通信を使用して **DAC80501** を構成し、DAC 出力電圧を設定するための、マイコン用に図示されています。必要に応じて、代わりに SPI2C ピンを High に設定することで、I²C プロトコルにより DAC80501 を制御できます。
- XTR200 MODE** ピンは、デバイス出力を電流出力 (MODE = Hi) または電圧出力 (MODE = Lo) に設定します。このピンは、両方の出力が必要な場合にはアイコンの GPIO から設定され、1 種類の出力のみが必要な場合には High または Low に接続できます。同じ回路図を使用して MODE = Lo に設定することで、高範囲の電圧出力を実現できます。
- XTR200** の SET ピンは、高精度抵抗を介してグランドに接続されます。電流モードでは、この高精度抵抗は電流レベルをスケーリングします。この回路を電圧モードでも使用する場合、この抵抗は使用されませんが、回路内に残しておくことができます。
- DAC80501 は、5V の電源で動作します。電流出力のみが必要な場合は、DAC80501 電源に 3.3V を使用できます。
- 5V 電源を使用する場合、DAC80501 デジタル入力ピンは 3.3V 動作に対応できます。V_{IH} 電圧は 1.62V、V_{IL} は 0.45V です。DAC80501 には、レジスタ構成を読み出すための SDO ピンはありません。
- また、XTR200 MODE デジタルピンは 3.3V 動作にも適しています。V_{IH} の電圧レベルは 1.65V、V_{IL} 電圧は 0.8V であることに注意してください。MODE ピンには 4μA の内部プルアップ電流があります。
- この回路の XTR200 は 15V 電源で示されています。ただし、このデバイスは、より大きな電圧範囲の場合、8V ~ 60V の電源で動作します。
- DAC80501 および XTR200 デバイスでは、どちらもそれぞれの電源ピンの近くにデカップリング コンデンサを使用します。DAC80501 は VDD ピンで 100nF のコンデンサを使用し、XTR200 は VSP ピンで同じコンデンサを使用します。DAC80501 には定格 10V 以上のデカップリング コンデンサを使用し、XTR200 には定格 25V 以上のデカップリング コンデンサを使用します。
- この回路では、DAC80501 は DAC に内部リファレンスを使用します。この内部リファレンスは、電源を初めて投入したときにデフォルトでイネーブルになります。VREFIO ピンは、ピンの近くに別の 100nF デカップリング コンデンサを使用します。より高い精度を得るために外部リファレンスが必要な場合は、VREFIO ピンに 1kΩ の抵抗を直列に接続して電流の競合を減らし、起動後に CONFIG レジスタ (0 x 03) の REF_PWDWN ビット [8] を 1 に設定して内部リファレンスをディスエーブルにします。
- XTR200 には、デバイス内のエラー状態を検出する内部回路があります。EF ピンで検出されたアラーム状態は、デバイスに以下の回路故障のいずれかがあるかどうかを示します。
 - 電圧出力モードで出力が短絡の電流制限に達した
 - 負荷電圧と電源電圧の間に十分なヘッドルームがないため、正しい電圧または電流出力が得られない。これは、入力電圧が 350mV 以上、電源電圧が 10V 以上の場合にのみ検出される
 - 電流出力モードで出力が開路となり、入力電源電圧が 10V を超えている場合のみ検出できる
 - SET ピン電流が短絡しているか、出力短絡電流制限の 1/10 を超えている
 - 電源電圧が 8V 未満である
 - ダイ温度が 150°C を上回っている
- この回路図に DAC80501Z が示されています。「Z」オプションの DAC コードのデフォルト設定は 0 x 0000 です。このデバイスの「M」オプションのデフォルト設定はミッドスケールで、DAC コードは 0 x 8000 です。

-
12. 前述のように、この回路は変更なしでアナログ電圧出力にも使用できます。この機能については、『[DAC80501 および XTR200 を使用した高精度、3 線式アナログ電圧出力トランシッタ](#)』で説明しています。

設計手順

電流出力モードで動作する場合、XTR200 MODE ピンは Hi に設定されます。出力電流の式は次のとおりです。

$$I_{OUT} = \frac{10 \times V_{IN}}{R_{SET}}$$

DAC80501 は入力電圧を XTR200 に設定します。DAC CONFIG レジスタは、REF-DIV = 1b および BUFF-GAIN = 1b に設定されます。これらの設定は内部的にリファレンス電圧を 2 分割し、出力バッファゲインを 2 に上げて、DAC の範囲を 0V ~ 2.5V に設定します。XTR200 は、SET ピンで高精度でドリフトが小さい高精度の 1.2kΩ 抵抗を使用します。R_{SET} 抵抗によって、電流出力が設定されます。DAC の入力電圧範囲と抵抗値によって、最終的な電流出力範囲が設定されます。

$$\text{Full-Scale Current Range} = \frac{10 \times 2.5V}{1.2k\Omega} = 20.833mA$$

この出力は公称値であるため、キャリブレーションを使用して出力を正確に設定できます。XTR の出力電流は、次の式を使用して DAC コードから計算できます。

$$\text{Current output} = \left(\frac{\text{DAC code}}{2^{16}} \right) \times 20.833mA$$

この構成では、20.833mA の範囲で LSB サイズは 0.32μA になります。別の電流範囲が必要な場合は、XTR200 の SET 抵抗値を、前の式とは異なる値にスケーリングできます。DAC で高分解能が必要ない場合は、このアプリケーションで 14 ビットの DAC70501 または 12 ビットの DAC60501 を使用できます。

DAC80501 のオプション設定では、REF-DIV = 0b および BUFF-GAIN = 1b に設定して、基準ゲインを 1 に、出力バッファゲインを 2 にします。この構成により、DAC フルスケール電圧が 5V に設定されます。次に、出力電流範囲を維持するため、SET 抵抗を 2.4kΩ に設定します。ただし、5V の範囲は DAC 電源に依存することに注意してください。電源電圧が 10% 減少する場合は、DAC の出力ヘッドルーム制限を回避するために、SET 抵抗の選択でこの追加の変動を考慮する必要があります。このセクションで最初に説明した設定では、REF-DIV = 1b を使用してリファレンスを 2 で除算すると、DAC 出力には出力バッファの電源ヘッドルームによる潜在的な低下はありません。

TUE 解析

総合未調整誤差 (TUE) は、寄与誤差の二乗和平方根を合計出力誤差に加えることによって計算されます。この計算は通常、ゲイン誤差、ゲイン誤差ドリフト、オフセット誤差、オフセット誤差のドリフト、非直線性誤差で構成されています。XTR200 電流出力の TUE 解析では、DAC80501 出力の TUE の計算から始めます。

『[DAC x 0501 16 ビット、14 ビット、12 ビット、1 LSB INL、電圧出力 DAC、高精度リファレンス内蔵](#)』データシートは、DAC80501 の TUE 誤差を便利に規定し、これらの誤差を「電気的特性」表の 1 つの最大値にまとめたものです。この回路では、DAC は REF-DIV = 1b と BUFF-GAIN = 1b で設定されています。このデバイスは WSON-8 パッケージで供給され、VSSOP パッケージよりも TUE 誤差がわずかに小さくなっています。

仕様表の DAC80501 (REF-DIV = 1b) の TUE 誤差 ±0.06% には、リファレンス誤差やリファレンスドリフトは含まれていないことに注意してください。DAC の合計誤差を計算するには、これらの誤差の二乗和平方根を加算したものを使用します。

$$\text{Err}_{\text{DAC REF-DIV1}} = \sqrt{\text{Err}_{\text{REF}}^2 + \text{Err}_{\text{REF Drift}}^2 + \text{Err}_{\text{TUE}}^2}$$

リファレンス誤差が $\pm 0.1\%$ (2.5V リファレンス電圧で 2.5mV)、ドリフトが $\pm 0.05\%$ (25°C から 125°C への 100°C に対して 5ppm/°C、室温による最大ドリフト) で、以下の結果が求められます。

$$\text{Err}_{\text{DAC REF-DIV1}} = \sqrt{0.1^2 + 0.05^2 + 0.06^2} = 0.127\%$$

DAC80501 の TUE を計算した後、XTR200 の TUE 計算に DAC 誤差を含めることができます。XTR200 電流モードに寄与する誤差は、オフセット電流誤差、オフセット電流ドリフト、スパン(ゲイン)誤差、スパンドリフト誤差、非直線性、および R_{SET} からの誤差です。電流モード出力の合計 TUE を決定するために、これらの誤差を DAC80501 TUE と組み合わせました。

誤差 (%)						
XTR 電流オフセット	XTR 電流オフセットのドリフト	XTR 電流ゲイン誤差	XTR 電流ゲインドリフト	非直線性	R_{SET} 抵抗の許容誤差	DAC80501 TUE 誤差
± 0.067	± 0.0288	± 0.07	± 0.02	± 0.003	± 0.1	± 0.127

『[XTR200 高精度、3 線式電流/電圧トランシミッタ](#)』のデータシートの「電気的特性」表によると、最大電流モード オフセットは $14\mu\text{A}$ です。この値は、 20.833mA のフルスケール電流範囲に基づいてパーセントに変換されます。ドリフト誤差は、室温からの 100°C の変化に基づいており、オフセットの最大ドリフトは $60\text{nA}/^\circ\text{C}$ 、ゲイン誤差ドリフトは $2\text{ppm}/^\circ\text{C}$ です。各部品の値は、2乗して合計されます。平方根は、電流出力の TUE 値を表します。

$$\text{TUE}_{\text{IOUT}} = \sqrt{\text{Err}_{\text{IOS}}^2 + \text{Err}_{\text{IOS Drift}}^2 + \text{Err}_{\text{IGE}}^2 + \text{Err}_{\text{IGE Drift}}^2 + \text{Err}_{\text{NonLin}}^2 + \text{Err}_{\text{RSET}}^2 + \text{Err}_{\text{DAC}}^2}$$

誤差値を挿入した後、電流出力 TUE に対して以下の結果が計算されます。

$$\text{TUE}_{\text{IOUT}} = \sqrt{0.67^2 + 0.029^2 + 0.07^2 + 0.02^2 + 0.003^2 + 0.1^2 + 0.127^2}$$

$$\text{TUE}_{\text{IOUT}} = \sqrt{0.0367} = 0.192\%$$

ゼロ コード誤差

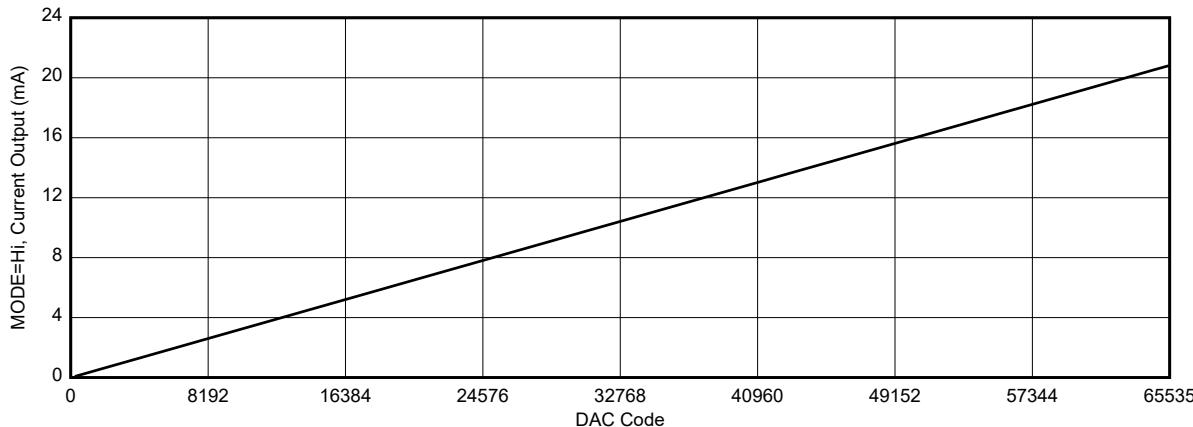
DAC80501 の DAC コード 0×0000 を入力しても、出力が正確に 0V に設定されません。ユニポーラ電源 DAC の場合、ゼロコード誤差が出力バッファに関連付けられます。このエンドポイント誤差は、出力バッファが出力を 0V に駆動できない場合に発生します。DAC80501 の場合、ゼロコード誤差は最大 1.5mV です。この電圧は、XTR200 の場合 $12.5\mu\text{A}$ の出力を表します。

ゼロコード誤差がより小さい別の DAC を使用する場合、XTR200 では 0V 入力付近で追加の制限が発生します。電流が $10\mu\text{A}$ を下回ると、XTR200 の電流出力は非線形になります。この値は、出力電流のリニア動作範囲の下限として記載されています。

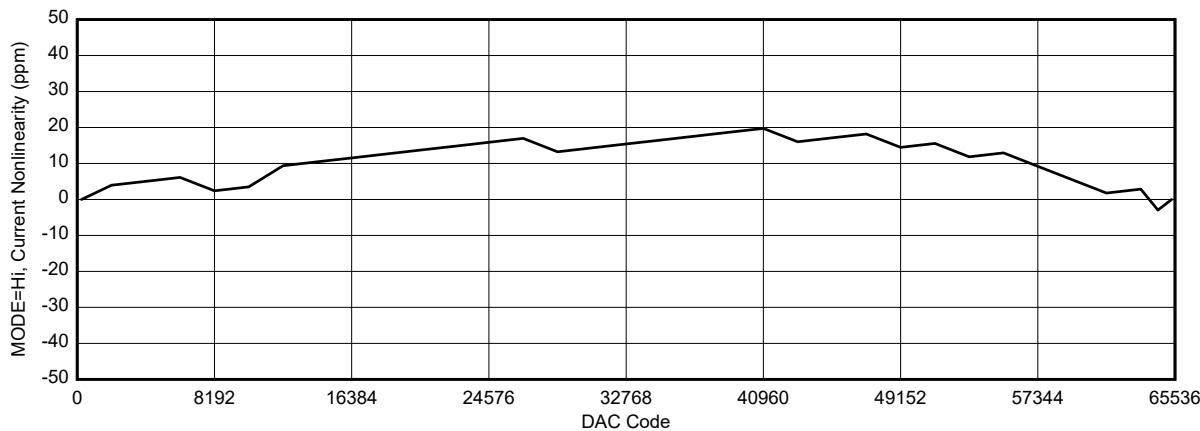
いずれにせよ、データシートの「電気的特性」表の注記に記載されているように、回路はエンドポイント制限として 256d から 65535d までの DAC80501 データコードを使用してテストされます。下側のエンドポイントは XTR200 の出力電流 $81\mu\text{A}$ を、上側のエンドポイントは 20.833mA を表します。

測定結果

この回路は、DAC80502-01EVM と XTR200EVM を使用して構築されたものです。DAC80502-01EVM は、USB 電源から引き出された 5V の VDD 電源を使用してセットアップされています。XTR200EVM は、外部 15V 電源から VSP に電力が供給されています。測定は Agilent® 34410A を使用して実施します。MODE = Hi の電流出力モードにおける、DAC コードから出力電流までの測定伝達関数は以下の図に示されています。



非直線性は出力範囲の測定値から計算され、プロットされています。エンドポイント FIT は、DAC コード 256d ~ 65535d から計算されます。



構築された回路の総ゲイン誤差、オフセット、非直線性を以下の表に示します。

パラメータ	測定値
ゲイン誤差	-0.027%
オフセット	0.66 μ A
非直線性	19.8ppm

レジスタ設定

このアプリケーションにおける DAC80501 の設定のレジスタ マップを以下の表に示します。

DAC80501 のレジスタ設定

レジスタ・アドレス	レジスタ名	設定	説明
0x03	CONFIG	0x0000	[15:9] 0000000b: 予約済み
			[8] 0b: REF_PWDWN。外部リファレンスを使用する場合は、このビットを 1 に設定します
			[7:1] 0000000b: 予約済み
			[1] 0b: DAC_PWDWN。このビットを 1 に設定すると、DAC の電源がオフになります
0x04	ゲイン	0x0101	[15:9] 0000000b: 予約済み
			[8] 1b: REF-DIV。リファレンス電圧を 2 で除算します
			[7:1] 0000000b: 予約済み
			[0] 1b: BUFF-GAIN。バッファアンプのゲインを 2 に設定します
0x08	DAC	0x0000	[15:0] 00000000b: DAC-DATA。DAC 出力コードを設定します

疑似コードの例

以下の疑似コードシーケンスは、DAC80501 と XTR200 を電流出力用に設定するために必要な手順を示しています。これらの例では、SPI 通信を使用した DAC の構成を示しています。DAC80501 には通信に I²C を使用するオプションがあることに注意してください。

```

Configure the SPI communication of the microcontroller to SPI mode 1 (CPOL = 0, CPHA =1 );
// Current mode
{Set microcontroller GPIO output to set MODE pin Hi for the XTR200;
}
// Internal reference and DAC output are enabled at start by default
// If using external reference, add series 1kΩ resistance at VREFIO to reduce contention current
// and disable internal reference, else skip this step
{Set CS to device Lo;
 Send 24 SCLKs, write 0x030100;
 // Set DAC REF_PWDWN = 1b [8] in CONFIG register, disables internal reference
 // DAC output can also be disabled in this register with DAC_PWDWN = 1b [0]
Set CS to device Hi;
}
// Configure DAC80501 output gain
{Set CS to device Lo;
 Send 24 SCLKs, write 0x040101;
 // DAC80501 output range 0V to 2.5V
 // Set DAC REF-DIV = 1b [8], BUFF-GAIN = 1b [0] in GAIN register
 // DAC output full-scale range set to reference voltage
Set CS to device Hi;
}
// Set DAC80501 Data Code
{Set CS to device Lo;
 Send 24 SCLKs, Write 0x083127;
 // Write DAC output code to 0x3127 (12583d), sets output current to 4mA
Set CS to device Hi;
}

```

使用デバイス

パラメトリック検索ツールを使用して、他の候補デバイスを検索してください。

デバイス	主な特長	リンク
DAC80501	DAC x 0501 16 ビット、14 ビット、12 ビット、1 LSB INL、電圧出力 DAC、高精度リファレンス内蔵	DAC80501
XTR200	XTR200 高精度、3 線式電流/電圧トランシッタ	XTR200
DAC80502-01EVM	DAC80502 / DAC80501 の評価基板	DAC80502-01EVM
XTR200EVM	XTR200 評価基板	XTR200EVM

設計の参照資料

テキサス インストルメンツの総合的な回路ライブラリについては、『[アナログ エンジニア向け回路クックブック](#)』を参照してください。

その他資料

- ・ テキサス インストルメンツ、『[DAC80502-01 評価基板ユーザー ガイド](#)』
- ・ テキサス インストルメンツ、『[XTR200 評価基板ユーザー ガイド](#)』
- ・ テキサス インストルメンツ、『[XTR200 による 4 ~ 20mA 電流および電圧出力 3 線式トランシッタの簡素化](#)』製品概要
- ・ テキサス インストルメンツ、『[DAC80501 および XTR200 を使用した高精度、3 線式アナログ電圧出力トランシッタ](#)』

TI エンジニアから直接サポートを受けるには、**E2E コミュニティ**をご利用ください：

e2e.ti.com

商標

Agilent® is a registered trademark of Agilent Technologies, Inc.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

重要なお知らせと免責事項

TIは、技術データと信頼性データ(データシートを含みます)、設計リソース(リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Webツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の默示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または默示的にかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したもので、(1)お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2)お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3)お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月