

4mA~20mA ループ電源トランスミッタの設計

Ahmed Noeman
System Engineer
SEM FAC, Freising

はじめに

プロセス制御システムでは、センサトランスミッタは圧力や温度のほか、流量やレベルなどのデータを照合し、その情報をプログラマブル ロジック コントローラ (PLC) または分散制御システムに伝達します。

このようなトランスミッタはコントローラへのデータ送信を、4mA~20mA の信号に依存しています。IO-Link や Profibus などの標準規格があるものの、4mA~20mA は、長距離伝送での耐障害性、信頼性、ノイズ耐性、あらゆる PLC システムとの互換性が高いです。

この記事では、4mA~20mA トランスミッタの構造、その動作原理、カタログ半導体製品を使用してこのタイプのトランスミッタを実装するための設計上の選択肢についての概要を説明します。

4mA~20mA トランスミッタの基本

4mA~20mA トランスミッタは、電力とワイヤの数 (4 線、3 線、2 線) で分類されます。この記事では、2 線式タイプに焦点を当てます。

図 1 に示す 2 線式フィールドトランスミッタでは、フィールド電源とアナログ入力モジュールに接続することで電流ループが形成されています。フィールドトランスミッタの最初のサブシステムはセンス サブシステムで、物理センサに接続し、その出力をコンディショニングし、信号をデジタル コードに変換して、線形化やキャリブレーションなどの処理を行います。2 番目のサブシステムは送信サブシステムで、ループから電力を取り出してトランスミッタに電力を供給し、デジタル信号をアナログ信号に変換してプロセス データを送信し、ループ電流を制御します。トランスミッタは、ループ内の電流をレギュレートして信号を送信し、電圧制御電流源として機能します。

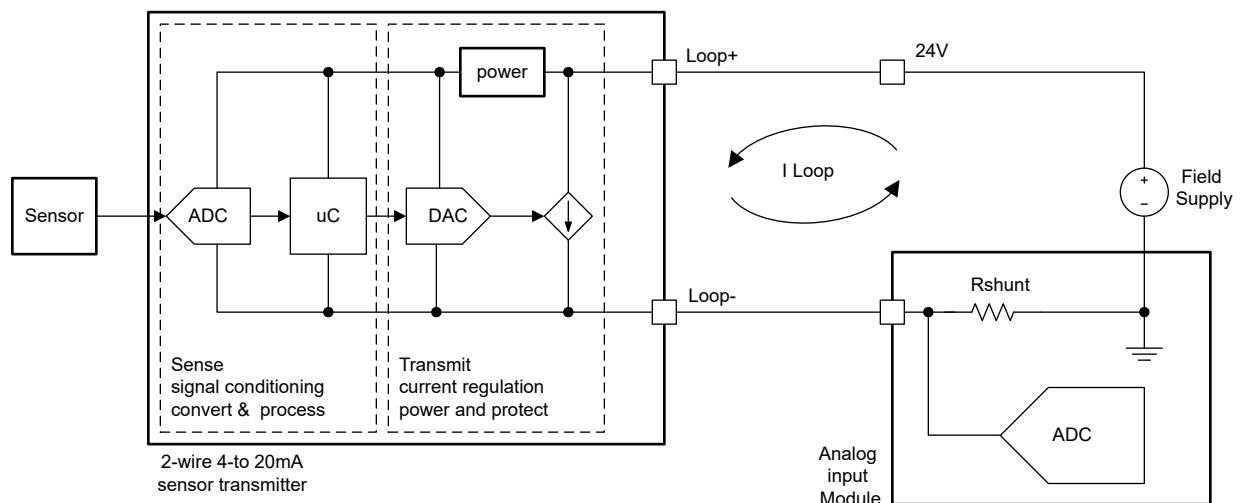


図 1. 汎用 2 線式 4mA~20mA センサトランスミッタ

図 2 では、N チャネル P チャネル N チャネル (NPN) トランジスタが電源を供給して電流をレギュレートし、そのベースは

D/A コンバータ (DAC) で駆動されるアンプを通して制御されます。広い入力電圧範囲に対応する低ドロップアウト (LDO)

レギュレータは、ループ電圧をトランスミッタの電源レベルに降圧することで、さまざまな部品に電力を供給します。DAC に内蔵のリファレンスがない場合は電圧リファレンスを使用できますが、HART (Highway Addressable Remote Transducer) 対応のトランスミッタには HART モデムが必要です。

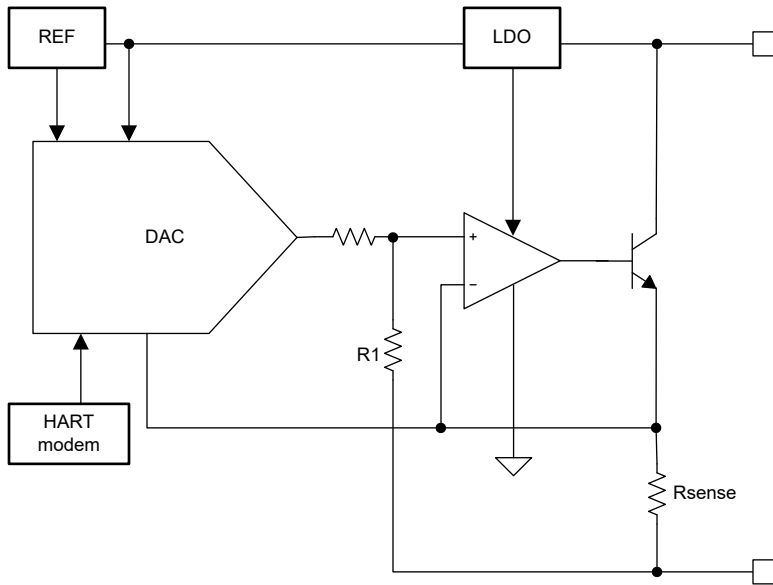


図 2.2 線式 4mA~20mA トランスミッタの回路

動作原理は非常にシンプルで、オペアンプの両方の入力を仮想ローカル グランドに保持します。R1 が保持する電圧は、Rsense も同様に保持します。適切なスケールにより、Rsense は R1 電流のスケールされたバージョンを伝達します。Rsense 電流がフィールドトランスミッタのほぼ全電流であることを考慮すると (図 2 に示されていないセンス部分を含めて)、DAC 出力はトランスミッタ全体の電流を制御しています。NPN トランジスタとアンプ ループは、必要な出力電流を得るために、トランスミッタ自体が使用する電流を補完するために必要な電流をバイパスします。

4mA~20mA トランスミッタの設計

4mA~20mA トランスミッタの設計に関する考慮事項は以下のとおりです。

- 低消費電力動作
- 小型フットプリント
- 産業用温度範囲全体にわたる高精度と低ノイズ
- HART プロトコルのサポート

- 低コスト

設計に関する性能指標

トランスミッタには評価が必要な性能指標がいくつかあります。

ループコンプライアンス電圧は、トランスミッタが機能するループ電圧の範囲です。主に LDO の制限値によって決定され、保護デバイスを含むループ内の直列素子の影響を受けます。代表的なループコンプライアンス電圧範囲は 12V~36V です。

分解能は、トランスミッタが生成できる個別の電流出力値の数で、DAC ネイティブ分解能に直接リンクしています。市販の 4mA~20mA トランスミッタの分解能は 12 ビット~16 ビットです。

直線性誤差の大部分は DAC の積分非直線性によって決定されます。これは、全出力範囲にわたる最大誤差 (最下位ビット [LSBs]) です。

ノイズは、出力ノイズ電流の 2 乗平均平方根 (RMS) で測定されます。このノイズによって出力レベルの一部が識別できなくなり、有効分解能が低下する可能性があります。ここで指す有効分解能とは、ノイズ性能の指標を意味します。16 ビット分解能のシステムの場合、信号帯域幅に応じて、13 ビット~15 ビットの有効分解能が期待されます。

精度は、理想的な電流値から電流出力がどれだけ逸脱しているかを測定するものです。オフセット誤差、ゲイン誤差、非直線性誤差の RMS 合計と、これらの値の温度ドリフトが含まれます。未調整誤差の合計は、不正確さのレベルを示します。

動的性能には、信号帯域幅とトランスミッタの安定性が含まれます。帯域幅とは、ループ上で伝送できる電流信号の最大帯域幅を指します。この帯域幅は、DAC のセトリングタイム、アンプ回路の帯域幅、バイパス トランジスタのトランスコンダクタンスによって決定されます。デジェネレーション抵抗を使用することで、トランジスタのトランスコンダクタンス (g_m) の変動に依存しなくなります。多くの場合、アンプ回路も外部で補償されます。安定性は、ループの帯域幅と補償コンデンサの値に関係します。ループの重要なノードの容量を減らすことで、安定性が確保されます。ループの安定性とその要件に関

する詳細な分析については、『DAC161S997 データシート』を参照してください。HART 対応のトランスミッタの場合、外付け部品で帯域幅を狭くすると、HART 信号との干渉を防止できます。

回路保護は、ループの逆極性やサージなどの異常な状態からトランスミッタを保護します。逆極性はダイオードによってブロックされます。トランスミッタを逆極性で動作させる場合は、**図 3** に示すように整流ブリッジを使用します。サージ保護には、過渡電圧サプレッサ ダイオード (TVS3301 など) と、高電圧イベント時の電流を制限する受動素子が必要です。これらの保護素子は、動作中にある程度の余裕が必要となり、最小コンプライアンス電圧が高くなります。

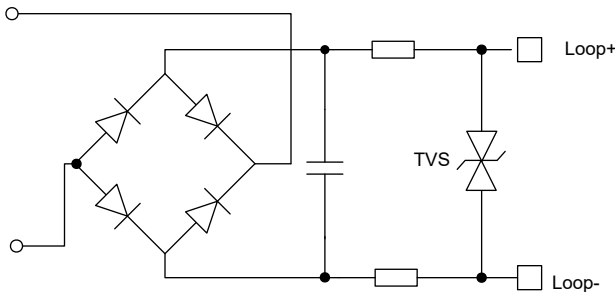


図 3. 2 線式トランスミッタの代表的な保護セクション

トランスミッタ回路の実装

図 2 に示すブロック図を実装する際の違いは、統合アプローチにあります。バイパストランジスタは、より優れた熱管理を可能にするため、常にディスクリート部品となっています。以下の実装はすべて、DAC8740H などの HART モデムを追加することで、HART プロトコルをサポートできます。

専用ループコンバータ

一つの方法としては、電圧リファレンスと出力アンプが内蔵された、『DAC161S997 データシート』のような DAC を使用することがあります。このソリューションは、**図 4** に示すように、DAC、広い入力電圧範囲の LDO、NPN トランジスタで構成されます。この実装の消費電流は 130 μ A で、キャリブレーションなしで優れた精度が得られます。DAC161S997 は、低電源または大電流負荷の場合に電流ループエラーを検出するための診断機能を備えており、4mA 未満のエラー低電流を信号出力します。

この設計はシンプルで、いくつかの外付け部品を使用してループの安定性を確保し、突入電流を制限しています。この方法における最大動作温度は 105 $^{\circ}$ C です。

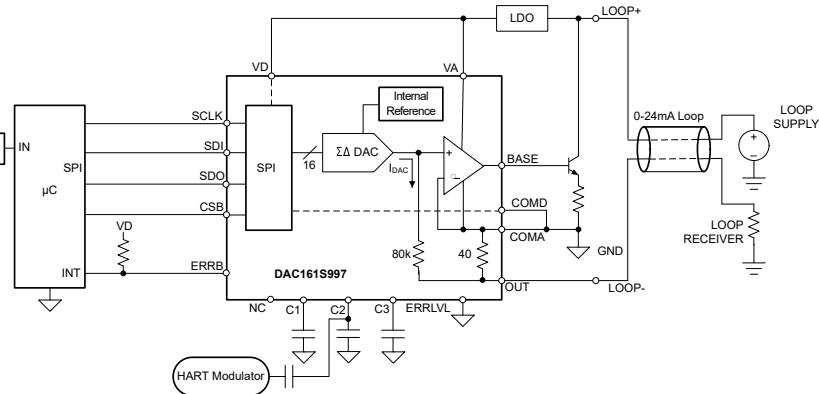


図 4. 2 線式 4mA~20mA トランスミッタ、DAC161S997 の場合
ループトランスミッタ デバイス

別の実装では、DAC8551 などの低消費電力 DAC を使用し、続けて LDO、電圧リファレンス、出力アンプを内蔵した XTR115 などの専用ループトランスミッタを使用します。この方法はノイズを最小限に抑え、ゲイン誤差は 1% 未満です。

XTR115 の動作温度は 85 $^{\circ}$ C に制限されており、内蔵された LDO の最大入力力は 36V です。他の選択肢として、XTR117 は小型パッケージで、より少ない静止電流を消費し、最高 125 $^{\circ}$ C で動作します。XTR117 に内蔵されている LDO は、最大 40V まで動作します。TXR117 には電圧リファレンスが内蔵されていないため、外部リファレンスが必要な場合は、**図 5** に示すように、LDO、DAC、電圧リファレンスで構成される 3 デバイス ソリューションとなります。

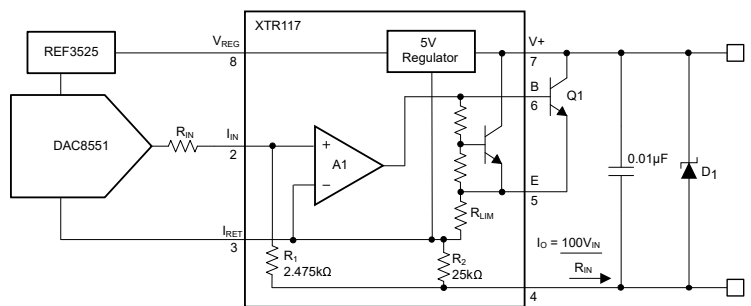


図 5. 2 線式 4mA~20mA トランスミッタ、XTR117 の場合

MCU 内蔵 DAC

コストを重視するアプリケーションでは、アナログ リソースを備えた MCU を使用することができます。MSPM0G MCU により、内蔵された 12 ビット DAC、内部リファレンス、出力アンプを含むトランスミッタ段の実装が可能です。図 6 に示すように、必要な外部デバイスは LDO だけです。MCU のデジタルプロセスにアナログ機能を実装しているため、専用のアナログ デバイスに比べて消費電力が比較的大きくなります。この方法は、極めて低コストで 11 ビットの有効分解能を必要とするアプリケーションに適しています。VREF- ピンをグラウンドの代わりに内部リファレンスの負のピンとして使用することで、性能を向上させることができます。VREF- ピンを分離すると、デジタル ノイズがアナログ リファレンスから分離されます。

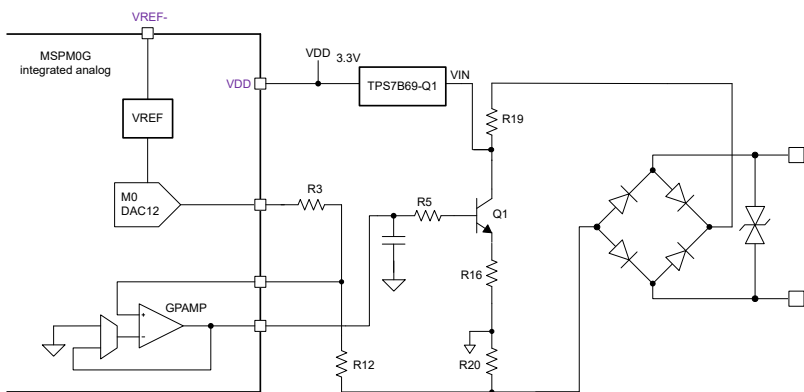


図 6. 2 線式 4mA~20mA トランスミッタ、MSPM0G の場合

PWM ベース DAC

MCU (内蔵 DAC なし) を使用するより一般的な方法は、パルス幅変調 (PWM) に基づいて DAC 出力を生成することです。シンプルな PWM DAC の分解能は 10 ビット~12 ビットです。ただし、2 パス PWM やアクティブ リプル抑制などのより高度な手法を使用すれば、16 ビット分解能の DAC を実現することもできます。

高い有効分解能を達成するため、PWM 信号は電圧リファレンス電源のロジック ゲートを使用してバッファリングされます。ループ電流へのデジタル ノイズ注入を避けるため、MCU には適切なバイパス処理が必要です。図 7 に示す実装は、低消費電力で、温度範囲全体で安定しており、極めて低コストで 13 ビットを超える有効分解能を実現します。

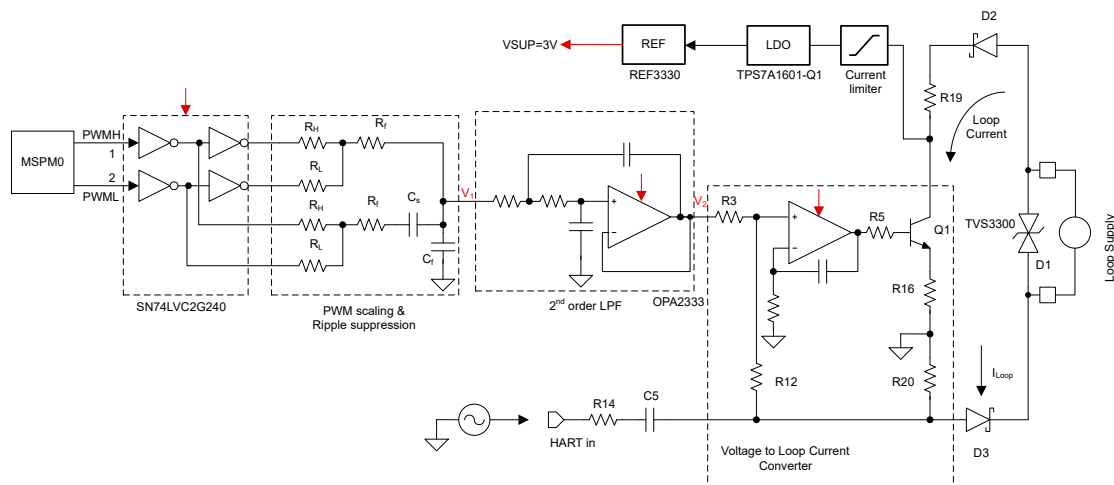


図 7. 2 線式 4mA~20mA トランスミッタ、PWM DAC の場合

スタンドアロンの低消費電力 DAC

図 8 に示す AFE88101 のような 4mA~20 mA トランスミッタを実現するために、スタンドアロンの低消費電力 DAC を使用すると、最高の分解能と直線性性能が得られます。さらに消費電力を低減するには、REF35125 のような低消費電力の電圧リファレンスを使用すると電流を 180μA まで抑えることができます。また、AFE88101 は、12 ビット ADC や定義済みのフェイルセーフモードなどの広範な診断機能を備えています。

AFE881H1 は AFE88101 とピン互換性があり、HART モデムが内蔵されたコンパクトな HART 対応トランスミッタです。AFE881H1 は、HART 対応時に低消費電力を実現します。HART モデムは通常、動作中に 10μA を消費するため、低消費電力の HART 対応トランスミッタに適したデバイスです。AFE88101 のもう一つの特長は、1.8V ロジックとの互換性

各種実装の比較

各種実装、推奨部品表 (BOM)、期待される性能を、表 1 と表 2 に示します。性能の数値は、限定的な測定によるものです。

	MSPM0 DAC12	M0 を使用した PWM	XTR117
BOM	MSPM0G、TPS7B69、DAC8740H	TPS7A1601、REF3330、TLV2333、DAC8740H	XTR117、DAC8551A、REF3525
コンプライアンス (電圧)	40	60	40
分解能 (ビット)	12	16	16
直線性 (LSB)	2	<6	8
有効分解能 (ビット)	11	13.4	14
精度	1% フルスケール、6μA	1% フルスケール、6μA	0.7% フルスケール、20μA
電流 (μA)	425	240	440
温度 (°C)	125	125	105
利点	低コスト	低コスト、高分解能、低消費電力	高解像度

表 1. 4mA~20mA トランスミッタの設計オプション、推奨 BOM および性能 (MSPM0 DAC12、M0 を使用した PWM、XTR117)

で、低電圧のデジタル動作を可能にし、MCU 入出力側の電力をさらに低減するだけでなく、電磁放射を低減します。

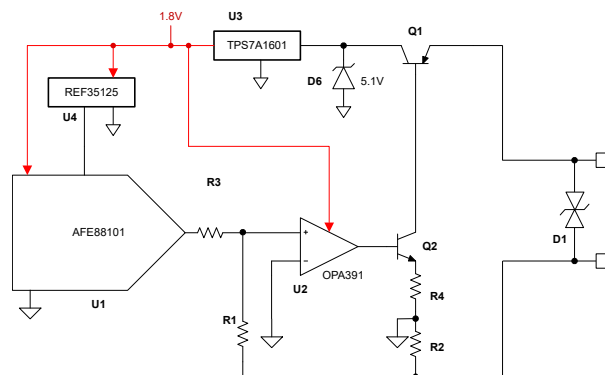


図 8. 2 線式 4mA~20mA トランスミッタ、AFE88101 の場合

DAC8311 DAC、LDO、外部低消費電力リファレンスを搭載した低コスト版は、130μA の電流で動作しながら妥当な性能を達成します。

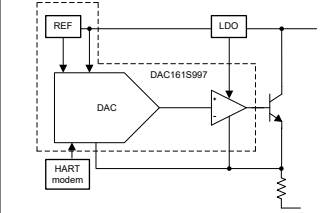
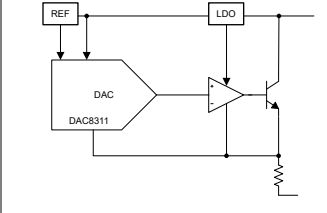
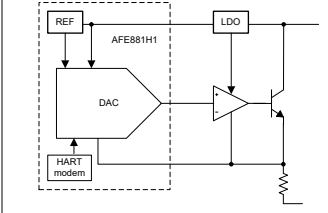
	DAC161S997	DAC8311	AFE881H1
			
BOM (部品表)	DAC161S997、TPS7A1601、DAC8740H (1)	DAC8311、REF3525、OPA391、TPS7B69、DAC8740H	AFE88101 (1)、REF35125、OPA391、TPS7A1601
コンプライアンス (電圧)	60V	40	60
分解能 (ビット)	16	14	16
直線性 (LSB)	5	4	4
有効分解能 (ビット)	13.4	13.4	16
精度	0.01%、1 μ A	0.15%	0.07%
電流 (μ A)	130	130	180 (内部リファレンス使用時 240)
温度 ($^{\circ}$ C)	105	125	125
コンプライアンス (電圧)	超低消費電力、高分解能、高精度	超低消費電力、低コスト	高分解能と高精度、低消費電力、低電圧

表 2. 4mA~20mA トランスミッタの設計オプション、推奨 BOM および性能 (DAC161S997、DAC8311、AFE881H1)

(1) DAC8740 の最大パワーダウン電流は 180 μ A で、水晶発振器を使用してアクティブな場合は約 300 μ A です。ただし、AFE881H1 HART モデムの平均消費電力は 10 μ A です。HART 対応の場合、該当する電流を追加してください。

まとめ

この選択プロセスにより、4mA~20mA トランスミッタを設計する際に正しい実装を決定することができます。

- 安全システムを構築し、最も高い精度で最も低いノイズ性能を必要とする場合や、200 μ A 未満の消費電力で HART 対応トランスミッタを使用したい場合、**AFE88101** と **AFE881H1** が最初の選択肢になります。
- DAC161S997** の実装では、可能な限り低い消費電力とフットプリントが提供され、次いで **DAC8311** の実装が続きます。消費電力より性能を優先する場合は **XTR117** の実装が適しています。

- 最もコストを抑えたい場合は、MSPM0G の実装を選択してください。その性能が満足のものではない場合、次のコスト最適化ソリューションは PWM ソリューションになります。

関連ウェブサイト

- 『**4~20mA 電流ループトランスミッタ、リファレンス デザイン**』
- 『**FSK モジュレーション付き、シングル電流ループを使用するデュアル センサ測定、リファレンス デザイン**』
- 『**2 線式、4~20mA トランスミッタ、EMC/EMI テスト済み、リファレンス デザイン**』
- 『**フィールドトランスミッタ向け高性能 16 ビット PWM から 4~20mA DAC**』
- 『**フィールドトランスミッタ向け高性能 PWM DAC の設計**』
- 『**AFE881H1 を使用した超低消費電力、低電圧、2 線式、4~20mA ループトランスミッタ**』
- 『**HART モデム搭載、高精度、ループ電源、4mA~20mA フィールドトランスミッタ、リファレンス デザイン**』

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

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黙示保証、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、明示的または黙示的にか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す。(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、その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、

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](#)、または [ti.com](#) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。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。

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

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated