

Application Note

CT、MRI および産業システムにおける電源モジュールおよびパワー エレクトロニクス部品の温度監視



Bill Xu, Wendy Wang, Rannie Zhou

概要

IGBT、SIC-MOSFET、GaN-MOSFET、MOSFET などの電源モジュールおよび電力部品は、医療システム、産業システム、電気自動車システムで広く使用されています。これらは、X 線管を駆動する高電圧電源の生成、大容量モータの駆動、太陽光パネルの DC 電圧を AC 電圧に変換して電力網に供給するインバータなどの役割を担っています。これらすべてのシステムにおいて、電源モジュールの温度を監視し、システムを安全かつ安定的に稼働させることが重要な課題となっています。これらのシステムでは、電源モジュールの正確な温度を取得するために、温度センサを電源モジュールやヒートシンクの近くに設置する必要があります。しかし、これらのシステムの電源モジュールは通常、高電圧電源で動作しており、ヒートシンクが高電圧バスの高電圧と接続されている可能性があります。この潜在的なリスクにより、温度監視システムは電源モジュールから絶縁され、制御システムの安全性を確保する必要があります。もう一つの問題は、温度センサをヒートシンクまたは電源モジュールに単純に取り付ける必要があることです。3 番目の問題は、低コストでコンパクトなサイズです。このアプリケーション ノートでは、電源モジュールの温度監視要件を満たすための温度監視方法をいくつか紹介します。

目次

1 はじめに.....	2
1.1 電源モジュールおよびパワー エレクトロニクス部品用の温度モニタ.....	2
1.2 電源部品の温度を監視するための重要な要因.....	3
2 電源モジュールの温度を監視する方法.....	4
2.1 スルーホール デジタル温度センサ搭載温度モニタ.....	4
2.2 アナログ温度センサと絶縁型アンプ搭載の温度モニタ.....	4
2.3 NTC サーミスタ搭載温度モニタ.....	6
3 まとめ.....	8
4 参考資料.....	8

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

IGBT、SIC-MOSFET、GaN-MOSFET、MOSFET などの電源モジュールは、医療、産業、電気自動車システムで広く使用されています。X 線、CT、MRI システムでは、設計者が IGBT や SIC-MOSFET を用いて、大容量の高電圧電源を生成し、X 線管やパワー グラディエント アンプを駆動しています。電力網システムでは、エンジニアが IGBT や SIC-MOSFET を用いて、太陽光パネルのインバータの DC 電圧を AC 電圧に変換し、電力網へ供給しています。電気自動車システムでは、エンジニアはモーターを駆動するために SIC-MOSFET または IGBT を使用しています。これらすべてのシステムにおいて、電源モジュールは大量の熱エネルギーを発生させます。適切な放熱処理がなされていない場合、故障率が高まり、システムの信頼性が低下する可能性があります。パワー エレクトロニクス システムを安全に稼働させるために、設計者は通常、電源モジュールの温度を監視し、故障から保護してシステムの信頼性を向上させる必要があります。

1.1 電源モジュールおよびパワー エレクトロニクス部品用の温度モニタ

多くの最新の電源モジュールには、IGBT や SIC-MOSFET の内部温度を高精度に監視するための 1～3 個の内蔵 NTC サーミスタが搭載されています。図 1-1 と図 1-2 を参照してください。しかし、多くの個別のパワー エレクトロニクス部品には、内蔵温度センサが搭載されていません。実際の設計では、エンジニアはヒートシンクや電力部品の表面温度を監視し、そこから IGBT や MOSFET の接合部温度を推定する必要があります。一般的に、ヒートシンクはパワー エレクトロニクス部品のサーマルパッドを介して取り付けられており、高電圧バスと接続される可能性があります。このため、温度センサがヒートシンクや電力部品に接続されていることから、温度監視回路は制御システムの安全を確保するために絶縁されている必要があります。

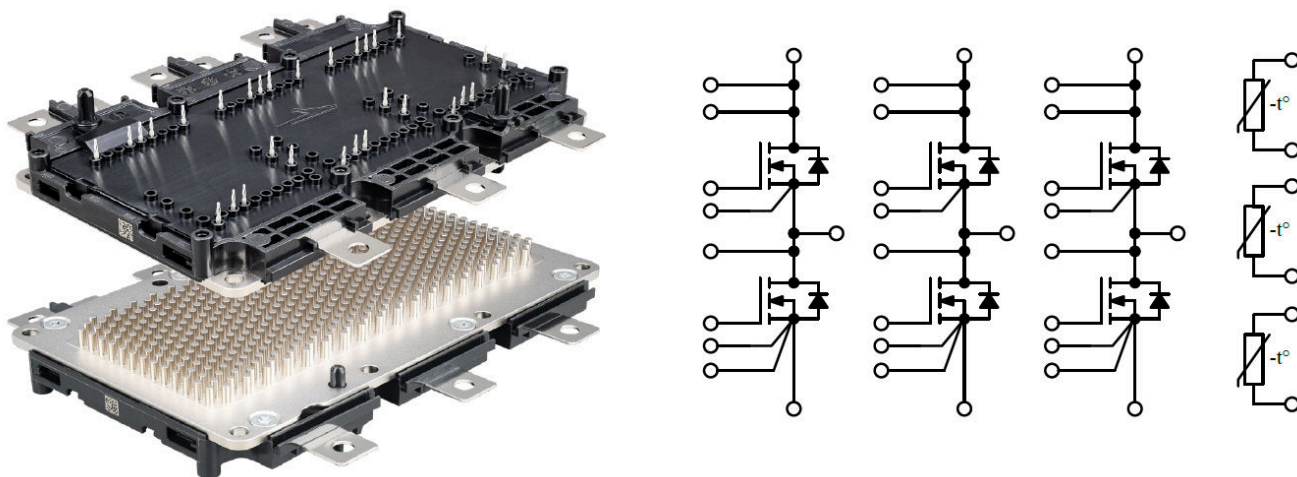


図 1-1. Wolfspeed SIC - MOSFET ECB2R1M12YM3

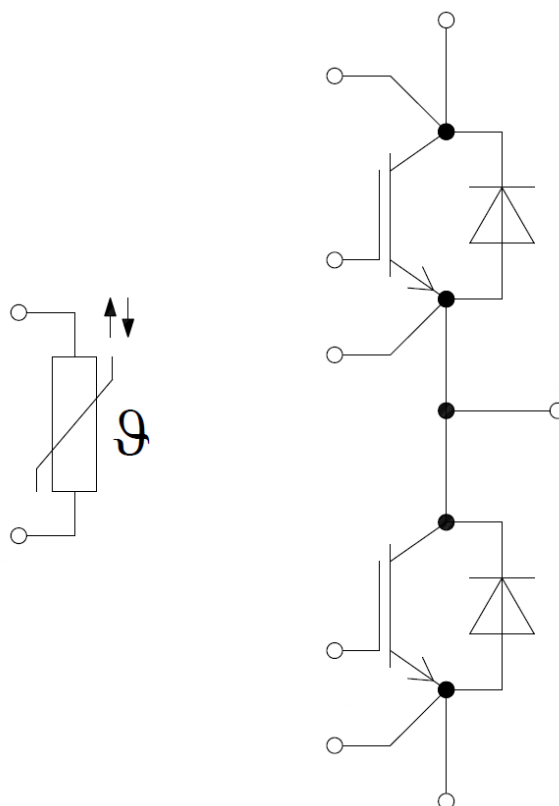


図 1-2. Infineon IGBT FF300R12ME7_B11

1.2 電源部品の温度を監視するための重要な要因

パワー エレクトロニクス部品の温度を監視するには、センサが高いバス電圧で短絡する可能性があるため、設計者は安全性を最初に考慮する必要があります。次に考慮すべき要素は、ヒートシンクや電力部品への取り付けが簡単な温度センサを選ぶことです。市場には多くの温度センサがありますが、その多くは表面実装型であり、ヒートシンクや電力部品への取り付けが簡単ではありません。三番目の要因は適切な精度やシンプルな回路などです。

2 電源モジュールの温度を監視する方法

TI は、電源モジュールの温度監視要件を満たす多様な温度センサおよび信号整形回路を取り揃えています。これらの温度センサにはさまざまなパッケージがあるため、設計者はヒートシンク電力部品への簡単な取り付けを考慮してスルーホールパッケージを選択できます。本アプリケーションの以下のセクションでは、安全性と簡単な取り付け条件を考慮した、ヒートシンクや電力部品の温度監視のための 3 つの方法を紹介します。

2.1 スルーホール デジタル温度センサ搭載温度モニタ

ヒートシンクや電力部品の温度を監視する最初の方法は、デジタル温度センサとデジタル アイソレータを組み合わせることで使用することです。LMT01 は、高精度な 2 ピンのスルーホールまたは表面実装型温度センサで、パルス カウント電流ループ インターフェイスを備えています。この設計により、ヒートシンクや電力部品の温度監視に適しています。LMT01 は、広い温度範囲で高精度なデジタル パルス カウント出力を備えており、内蔵 ADC の性能や有無を気にせず、あらゆる MCU や FPGA と組み合わせることができます。また、ソフトウェアの負荷も最小限に抑えられます。TI の LMT01 デバイスは、 -20°C から $+90^{\circ}\text{C}$ の温度範囲でシステムの較正やハードウェア ソフトウェア補正を必要とせず、最大 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の高精度 (分解能 0.0625°C) を実現しています。

LMT01 の温度出力は、単一線式を介して一連の電流パルスで伝送され、通常は $34\mu\text{A}(0)$ から $125\mu\text{A}(1)$ に変化します。単純な抵抗器を用いて、電流パルスを電圧に変換することができます。10k Ω の抵抗を使用した場合、出力電圧レベルは通常 340mV から 1.25V の範囲になります。単純なマイコン内蔵のコンパレータや外部トランジスタを用いて、この信号を MCU や FPGA が GPIO ピンで正しく処理できる有効な論理レベルに変換することが可能です。電力部品の温度を安全に監視するためには、MCU や FPGA とヒートシンクまたは電源部品の間にはデジタル アイソレータを必ず使用する必要があります。提案されるシステム ソリューションを、図 2-1 に示します。この例では、ISOW7821 デジタル アイソレータを選択しています。ISOW7821 は、3.3V で 75mA の電流を供給可能な絶縁型高効率電源を内蔵しており、LMT01 への電力供給に十分対応しています。

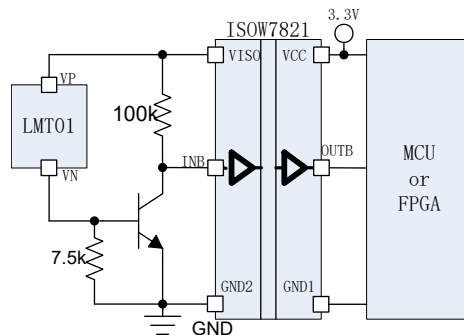


図 2-1. LMT01 を使用したパワー エレクトロニクス モジュールの温度監視

LMT01 から温度を得るには、設計者は 2 つの方法があります。最初の方法は最も精度が低く、一階の方程式を使用します。二番目の方法は最も精度が高く、参照テーブル (LUT) 内の値を線形補間して使用します。電力部品の温度監視には、一階方程式の精度で十分とされています。設計者が必要とする精度が $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 未満の場合は、参照テーブル方式を使用する必要があります。出力の伝達関数は線形であり、式 1 で近似できます

$$Temp = \left(\frac{PC}{4096} \times 256^{\circ}\text{C} \right) - 50^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

ここで PC はパルス数、Temp は温度読み取り値です。

LMT01 が温度のデジタル変換とパルスレインの時間間隔を実装する合計時間は最大で 104ms です。電源が継続的に供給されている場合、パルスレイン出力は最大 104ms ごとに繰り返されます。一般的に温度変化は緩やかなため、この出力周期は温度監視には十分です。

2.2 アナログ温度センサと絶縁型アンプ搭載の温度モニタ

設計者が使用できる第二の方法は、絶縁アンプ付きのアナログ温度センサーを用いて、ヒートシンクや電力部品の温度を測定することです。LM35 は、摂氏温度に比例した直線的な出力電圧を持つ高精度集積回路温度センサです。LM35 デバイスは、ケルビン温度で較正された線形温度センサに比べて優れており、ユーザが出力から大きな定数電圧を差し引く

必要なく、扱いやすい摂氏スケールで温度を得られます。LM35 は、外部での校正や調整を必要とせず、室温付近で $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ 、および -55°C から $+150^{\circ}\text{C}$ の広範囲で $\pm 0.75^{\circ}\text{C}$ の典型的な高精度を実現します。LM35 の出力電圧と周囲温度の関係は、式 2 に示す通りです。

$$V_{out} = 10\text{mV}/^{\circ}\text{C} \times T \quad (2)$$

ここで V_{out} は LM35 の出力電圧を示し、 T は摂氏温度 ($^{\circ}\text{C}$) です。LM35 の特長は、多くの一般的な温度測定用途や遠隔温度測定用途に適した設計となっています。複数のパッケージ オプションにより、柔軟性が拡大しています。ヒートシンクや電力部品の温度を測定する場合は、取り付けが簡単な TO92 または TO220 パッケージを選択します。

電力部品は多くの場合、高電圧システム内で動作します。電力部品の温度を安全に監視するため、高電圧部と制御システム間には絶縁が採用されています。AMC1350 は高精度の絶縁型アンプで、磁気干渉に対して高い耐性のある絶縁バリアを使用し、入力側と出力側の回路を分離しています。 $\pm 5\text{V}$ の入力範囲により、AMC1350 はほとんどのアナログ温度センサと適合します。AMC1350 は、このアプリケーション用に設計されたデバイスです。AMC1350 および LM35 の入力側電源には、この例では UCC33420 絶縁型電源モジュールが推奨されています。この提案は、図 2-2 に示すように、LM35、AMC1350、UCC33420 をベースに設計されています。TLA2022 は、IIC インターフェイス搭載の 12 ビット差動入力 SAR ADC です。

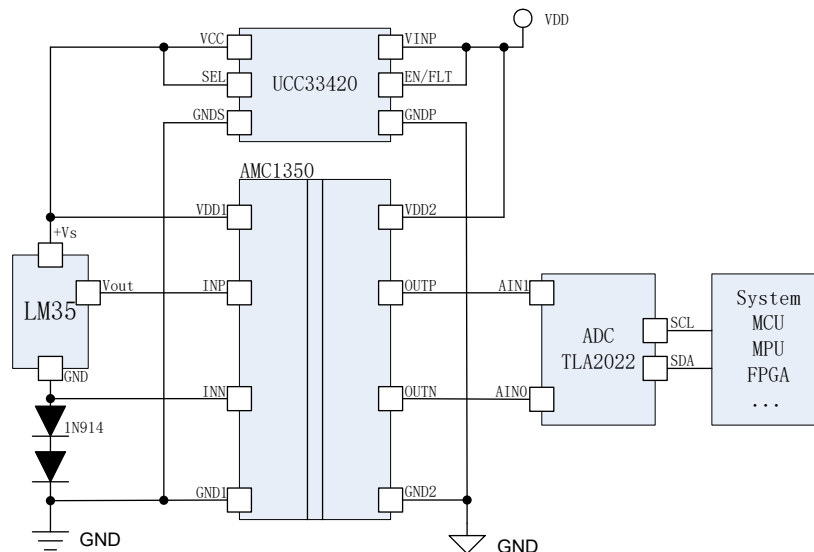


図 2-2. LM35 アナログ温度センサを用いたパワー エレクトロニクス部品の温度検出

2.3 NTC サーミスタ搭載温度モニタ

大容量のパワー エレクトロニクス機器では、多くの場合、パワー部品に 1 個または 3 個の NTC が組み込まれ、温度監視とシステムの信頼性向上に役立っています。この場合、温度センサ自体は不要ですが、外部の信号整形回路が必要となります。NTC 抵抗を測定する従来の信号整形回路は、抵抗分圧回路またはブリッジ回路です。図 2-3 と図 2-4 を参照してください。どちらの回路も外部に高精度な電圧基準が必要となるため、コスト増加やパッケージ サイズの大きさにつながります。もう一つの問題は、基準電圧と出力信号の間に非線形性があることです。抵抗分圧回路では、共通モード電圧が大きいことも問題であり、これが分解能の低下を引き起こします。ブリッジ回路では外部の計装アンプが必要となり、これもコスト増加の要因となります。

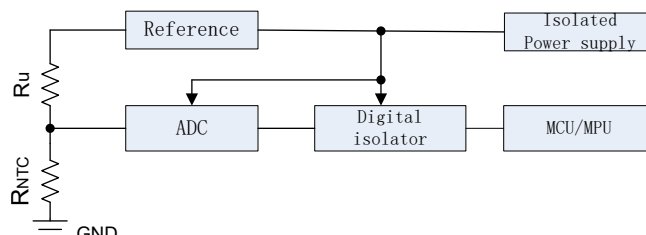


図 2-3. 内部 NTC 抵抗を備えたパワー エレクトロニクス部品の温度監視用抵抗分圧回路のブロック図

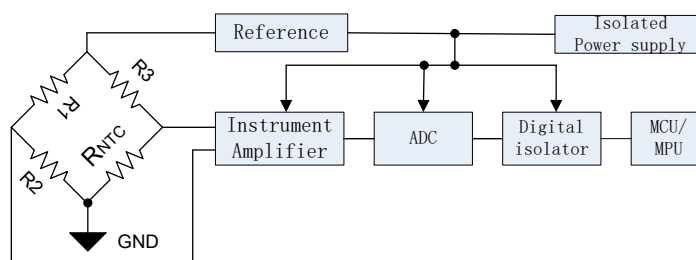


図 2-4. 内部 NTC 抵抗を備えたパワー エレクトロニクス部品の温度監視用ブリッジ回路のブロック図

ADS124S08 は、12 チャンネル入力の 24 ビット高解像度 ADC であり、NTC の励起および補償線抵抗用に 2 つの調整可能な定電流源を内蔵しています。ADS124S08 は、3 つの NTC センサと直接接続できます。いずれの時点でも、同時にテストできるのは 1 つの NTC のみです。テストされていない残りの NTC については、対応するチャンネルの内部マルチプレクサをオフにする必要があります。システム設計については、図 2-5 を参照してください。ISOW7741 は、電源モジュール内蔵のデジタルアイソレータで、ADS124S08 への電力供給に使用できます。ISOW7741 の 2 番目の機能は、ISO7720 デジタルアイソレータと連携して、ADS124S08 SPI インターフェイスと接続します。

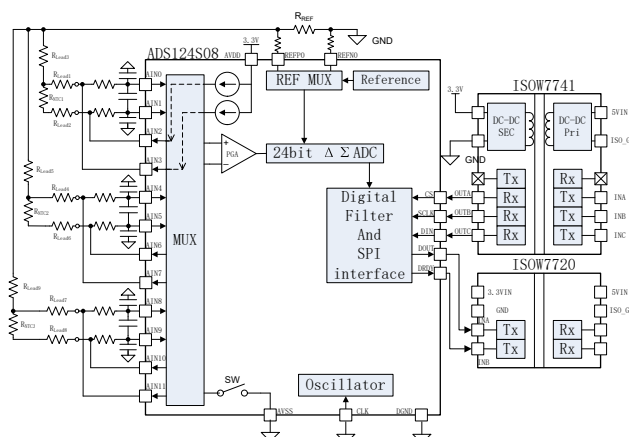


図 2-5. ADS124S08 によるパワー エレクトロニクス部品内蔵の 3 つの NTC センサとのインターフェイス

ADS124S08 のデータシートをご覧ください。式 3 に、基準抵抗と NTC 抵抗の間の機能を示します

$$D = \frac{V_{NTC}}{V_{REF}} \times 2^{24} = \frac{I_{Excite} \times R_{NTC}}{2 \times I_{Excite} \times R_{REF}} \times 2^{24} = \frac{R_{NTC}}{R_{REF}} \times 2^{23} \quad (3)$$

so:

$$R_{NTC} = \frac{D}{2^{23}} \times R_{REF} \quad (4)$$

パワー モジュールが温度監視用に 1 つの NTC のみを内蔵している場合は、ADS122C04 が推奨されます。このデバイスは ADS124S08 に類似していますが、4 チャンネル入力で、NTC を励起するための 2 つの定電流源と、MCU や FPGA と接続するための IIC インターフェイスを内蔵しています。ISO1642 は、ADS122C04 の安全操作に推奨されるデジタルアイソレータです。NTC の抵抗値を求める機能は ADS124S08 とまったく同じです。詳細については、ADS122C04 のデータシートをご覧ください。図 2-6 は、ハーフ ブリッジ IGBT の温度を監視するためのシステム設計を示します。

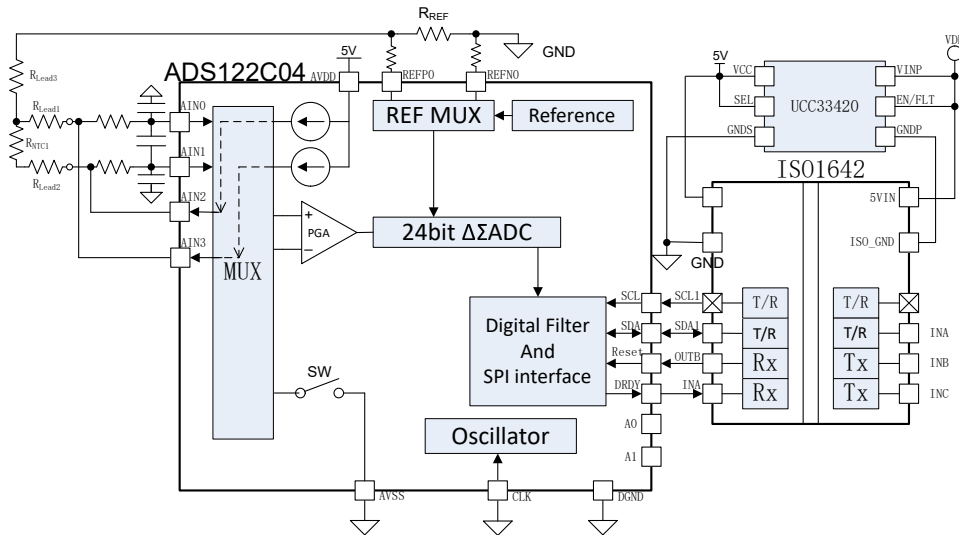


図 2-6. ADS122C04 によるパワー エレクトロニクス部品内蔵 NTC センサとのインターフェイス

3 まとめ

電源モジュールおよび電力部品の温度監視は、特に大容量パワー エレクトロニクス システムにおいて、安全な稼働を維持するために重要です。内蔵温度センサを持たない電力部品には、高精度かつヒートシンクや電力部品への取り付けが簡単な LMT01 および LM35 が推奨される温度センサです。内蔵 NTC を備えた電源モジュールには、より優れた線形性、高精度、配線補償、励起用定電流源内蔵、小型パッケージを特長とする ADS124S08 および ADS122C04 が推奨される信号整形回路です。詳細については、関連するデータシートをご覧ください。TI は、ADS124S08 に類似しつつ、解像度や入力チャネル数、インターフェイスが異なる複数の ADC 製品をラインアップしており、お客様の多様なニーズに対応しています。詳細については、FAE を参照するか、またはを参照してください。

4 参考資料

1. テキサス インスツルメンツ、『[RTD 測定に関する基本的なガイド](#)』、アプリケーション ノート。
2. テキサス インスツルメンツ、『[NTC および RTD による温度監視システムの設計](#)』アプリケーション ノート。
3. テキサス インスツルメンツ、『[LMT01 パルス カウント インターフェイス搭載、 \$\pm 0.5^{\circ}\text{C}\$ 高精度 2 ピン デジタル出力温度センサ](#)』データシート。
4. テキサス インスツルメンツ、『[ISOW7821 高効率低放射 DC/DC コンバータ内蔵、高性能、5000VRMS 強化デュアル チャネル デジタル アイソレータ](#)』データシート。
5. テキサス インスツルメンツ、『[LM35 高精度摂氏温度センサ](#)』データシート
6. テキサス インスツルメンツ、『[UCC33420 超小型、1.5W、5.0V、3kVRMS 絶縁、産業用 DC/DC モジュール](#)』データシート。
7. テキサス・インスツルメンツ、『[AMC1350 高精度 \$\pm 5\text{V}\$ 入力、強化絶縁型アンプ](#)』データシート
8. テキサス・インスツルメンツ、『[ADS124S0x 低消費電力、低ノイズ、高集積の 6 チャネルおよび 12 チャネル、4kSPS、24 ビット デルタ シグマ ADC、PGA と電圧リファレンス内蔵](#)』データシート。
9. テキサス インスツルメンツ、『[ISOW774x 低放射低ノイズ DC/DC コンバータ内蔵、クワッド チャネル デジタル アイソレータ](#)』データシート
10. テキサス インスツルメンツ、『[ISO772x 高速、堅牢な EMC 強化型、ベーシック デュアル チャネル デジタル アイソレータ](#)』データシート。
11. テキサス インスツルメンツ、『[ADS122C04、24 ビット、4 チャネル、2kSPS、I2C インターフェイス搭載デルタ シグマ ADC](#)』
12. テキサス インスツルメンツ、『[ISO164x: EMC 強化および GPIO 機能付きホットスワップ対応双方向 I2C アイソレータ](#)』データシート。
13. テキサス インスツルメンツ、『[TLA202x コスト最適化超小型、12 ビット、システムモニタリング ADC](#)』データシート。

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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 テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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 テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツ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 © 2025, Texas Instruments Incorporated

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、TI は一切の責任を拒否します。

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 © 2025, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月