

Technical White Paper

フォトカプラーをデジタル アイソレータに交換することで実現するシステム性能の向上



概要

一般に絶縁と呼ばれるガルバニック絶縁は、DC 電流や望ましくない AC 電流を防止し、システムの 2 つのセクション間に直接導通パスを回避する手段です。絶縁により、これら 2 つのセクション間で、信号伝送、電力伝送、または両方を可能にしながら、これらの動作を実行できます。ガルバニック絶縁を実現する半導体デバイスを、アイソレータと呼びます。フォトカプラーは、半導体業界で最初に導入されたアイソレータの 1 つであり、専用の絶縁技術として数十年にわたって業界を支配してきました。

ここ数十年の半導体技術の進歩に伴い、静電容量性絶縁や磁気性絶縁など、他の多くの絶縁技術が採用されています。これらの技術は、フォトカプラーと同様の機能を実現し、全体的な性能が優れている他の絶縁技術が数多く登場しています。競合する技術の中で、TI の二酸化ケイ素 (SiO_2) ベースのデジタル絶縁技術は、特に高電圧定格、電気的特性、スイッチング特性、信頼性において、業界最高の性能を発揮します。本ホワイトペーパーでは、さまざまな性能パラメータに関して、TI のデジタル アイソレータと一般的なフォトカプラーのいくつかを比較します。標準インターフェイス回路における TI のデジタル アイソレータとフォトカプラーの比較については、『[標準インターフェイス回路でフォトカプラーをデジタル アイソレータに置き換える方法](#)』を参照してください。高信頼性かつ堅牢な方法でフォトカプラー設計をアップグレードすることを希望している場合は、TI のピン互換 [フォトカプラー エミュレータ](#) 製品を検討してください。

目次

1 アイソレータの構造.....	2
2 スイッチング性能.....	3
3 TDDB テストによるアイソレータの寿命.....	5
4 ソリューション サイズ.....	6
5 経年劣化および信頼性.....	7
6 同相モード過渡耐性 (CMTI).....	7
7 フォトカプラー電流入力とデジタル アイソレータ CMOS 電圧入力の比較.....	7
8 まとめ.....	8
9 参考資料.....	8

図の一覧

図 1-1. 代表的なフォトカプラーの構造.....	2
図 1-2. TI のデジタル アイソレータの構造.....	2
図 3-1. フォトカプラーと TI のデジタル アイソレータの TDDB 寿命の比較.....	5
図 4-1. ISO6741 および ISO7762 によるフォトカプラー占有面積の比較.....	6

表の一覧

表 1-1. さまざまな絶縁素材の絶縁耐力.....	2
表 2-1. 汎用フォトカプラーと TI デジタル アイソレータのタイミング仕様の比較.....	3
表 2-2. 高速フォトカプラーと TI のデジタル アイソレータのタイミング仕様の比較.....	4

1 アイソレータの構造

デジタル アイソレータとフォトカプラは類似した機能を備えていますが、これらのデバイスは構造と動作原理がかなり異なります。フォトカプラは LED を使用して、絶縁バリア（またはインシュレーション バリア）にまたがる形でデジタル情報またはアナログ情報を伝達します（多くの場合、バリアは何もない空間ギャップ）。図 1-1 に示されているように、一部のフォトカプラは、絶縁材料としてエポキシを使用しており、その絶縁耐力は空気よりわずかに優れています。一方、デジタル アイソレータは、静電容量性絶縁と磁気性絶縁のどちらかを使用することができます。図 1-2 に示されているように、静電容量性デジタル アイソレータは、 SiO_2 を絶縁体として使用した 2 つの直列絶縁コンデンサで構成されています。磁気性絶縁は、絶縁体で分離されたコイルを利用します。表 1-1 に示されているように、TI は静電容量性絶縁と磁気性絶縁の両方で SiO_2 を活用しており、競合する絶縁技術で使用される絶縁体に比べて、絶縁材料の中で最高の絶縁耐力と非常に強力な性能を実現しています。

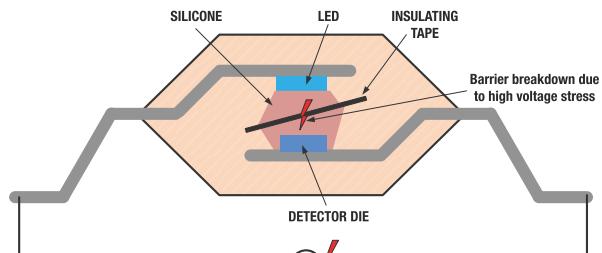


図 1-1. 代表的なフォトカプラの構造

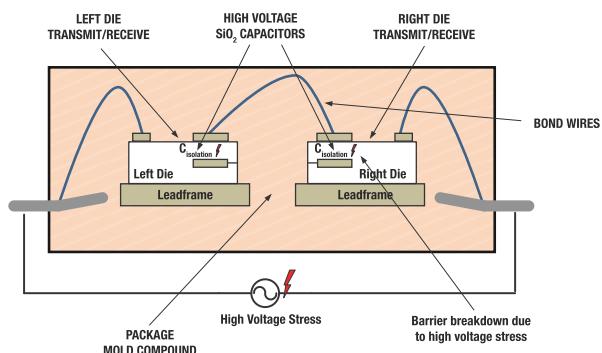


図 1-2. TI のデジタル アイソレータの構造

表 1-1. さまざまな絶縁素材の絶縁耐力

絶縁材の組成	誘電体強度
空気	約 $1V_{RMS}/\mu m$
エポキシ	約 $20V_{RMS}/\mu m$
シリカを充てんしたモールド樹脂	約 $100V_{RMS}/\mu m$
ポリイミド	約 $300V_{RMS}/\mu m$
SiO_2	約 $500V_{RMS}/\mu m$

2 スイッチング性能

アイソレータは、データ、制御、ステータス信号の絶縁が必要な多くの産業および車載アプリケーションで広く使用されています。絶縁型データ、制御信号、ステータス信号を適時に処理できるようにするには、アイソレータが最適なスイッチング特性を達成し、システム全体のタイミング性能への影響を最小限に抑えることが重要です。フォトカプラのスイッチング特性は非常に劣っているのに対し、デジタル アイソレータは業界最高レベルのスイッチング特性を実現します。そのため、より多くのシステムでその性能要件を満たすことが可能になります。

一般的に、汎用フォトカプラの場合は、サポートされているデータレートがないため、特定のアプリケーションに対するそれぞれの適合性を把握するのが困難です。ほとんどの場合、これらのフォトカプラにはオープンコレクタ出力もあり、いくつかの選択プルアップ抵抗値または負荷抵抗値のみで特性付けされます。TI の最新デジタル アイソレータの 1 つである **ISO6441** は、サポートされている最大データレートが **150Mbps** であることがデータシートに明確に示されています。そのため、特定のアプリケーションに対するこの製品の適合性を容易に把握できます。フォトカプラとは異なり、デジタル アイソレータは動作に外部プルアップ抵抗が不要で、最大データレートは外付け部品に大きく依存しません。

表 2-1 に、汎用フォトカプラと TI デジタル アイソレータのタイミング仕様の比較を示します。この表の情報には、データシートのタイミング仕様を使用して達成される非同期および同期データレートの推定値も含まれています。**表 2-1** には、汎用フォトカプラを使用して実現できるデータレートが、デジタル アイソレータを使用した場合よりもはるかに低いことが示されています。フォトカプラの欄には $R_L = 100\Omega$ と $R_L = 1.9k\Omega$ という 2 つのプルアップ抵抗オプションが示されていますが、これはデジタル アイソレータに比べて消費電流が大幅に大きいため、多くのアプリケーションに適しません。

表 2-1. 汎用フォトカプラと TI デジタル アイソレータのタイミング仕様の比較

部品番号	汎用フォトカプラ		ISO6441	ISO6741
パラメータ	$R_L = 100\Omega$	$R_L = 1.9k\Omega$	VCC = 5V	VCC = 5V
チャネルあたりの入力順方向電流 / ICC1 (標準値、mA)	2.0	16.0	2.2	1.8
チャネルあたりのオン状態でのコレクタ電流 / ICC2 (標準値、mA)	50.0	2.6	4.5	3.2
立ち上がり時間、 t_r (標準値、μs)	2.0	0.8 ⁽¹⁾	0.002	0.005
立ち下がり時間、 t_f (標準値、μs)	3.0	35.0 ⁽¹⁾	0.002	0.005
ターンオン時間 / 伝搬遅延、 t_{pHL} (標準値、μs)	3.0	0.5	0.006	0.011
ターンオフ時間 / 伝搬遅延時間、 t_{pLH} (標準値、μs)	3.0	40.0	0.006	0.011
伝搬遅延スキー、 t_{sk} (最大値、ns)	-	-	0.003	0.006
最大非同期データレート ((T = 最大値 (t_r , t_f) × 2/0.6 + t_{sk})、標準値、Mbps)	0.1	0.008	80.6	47.6
最大同期データレート ((T = 最大値 (t_{pHL} , t_{pLH}) × 4)、代表値、Mbps)	0.028	0.006	41.7	22.7

(1) 推定値

高速フォトカプラは、汎用フォトカプラに比べてスイッチング特性が優れています。表 2-2 に、代表的な高速フォトカプラと TI のデジタル アイソレータの比較を示します。ここでは、各デバイスのデータシートに記載されているタイミング仕様を用いて、デバイスの非同期と同期データレートを推定しています。比較表に示されているように、デジタル アイソレータは、高速フォトカプラに比べて依然としてかなり高いデータレートに対応しています。

表 2-2. 高速フォトカプラと TI のデジタル アイソレータのタイミング仕様の比較

部品番号	高速フォトカプラ		ISO6441	ISO6741
パラメータ	I _F = 14mA	I _F = 6mA	VCC = 5V	VCC = 5V
チャネルあたりの入力順方向電流 / ICC1 (標準値、mA)	14.0	6.0	2.2	1.8
立ち上がり時間、t _r (標準値、ns)	15.0	15.0	2	4.5
立ち下がり時間、t _f (標準値、ns)	15.0	15.0	2	4.5
ターンオン時間 / 伝搬遅延、t _{PHL} (標準値、ns)	33.0	40.0	6.2	11
ターンオフ時間 / 伝搬遅延、t _{PLH} (標準値、ns)	27.0	30.0	6.2	11
伝搬遅延スキー、t _{sk} (最大値、ns)	30.0	30.0	3	6
最大非同期データレート ((T = 最大値(t _r , t _f) × 2/0.6 + t _{sk})、標準値、Mbps)	12.5	12.5	80.6	47.6
最大同期データレート ((T = 最大値(t _{PHL} , t _{PLH}) × 4)、代表値、Mbps)	7.6	6.3	41.7	22.7

3 TDDB テストによるアイソレータの寿命

経時絶縁破壊 (TDDB) テストは、絶縁寿命を電圧の関数として判定するための業界標準の加速ストレステストです。このテストは、デバイスの絶縁バリア越しに、標準的な動作電圧よりもはるかに高いさまざまなストレス電圧を印加し、絶縁体が破壊されるまでに要する時間を監視します。これらの電圧と時間の各座標を適切なグラフにプロットし、これらの座標をより低いストレス電圧に外挿して、適切な動作電圧において予想される絶縁寿命を判定します。

図 3-1 に、TI のデジタル アイソレータの TDDB プロットと一般的なフォトカプラとの比較を示します。フォトカプラの平均 TDDB ラインは、デジタル アイソレータの平均 TDDB ラインより約 2 幕乗 (100 倍) 低いことがわかります。これら 2 つの技術の TDDB 寿命にこのような大きな違いがある主な理由は、使用する絶縁材料の絶縁耐力に大きな違いがあることです (表 1-1 を参照)。特定のストレス電圧に対するフォトカプラの寿命はサンプルによって大きく異なりますが、デジタル アイソレータの場合はサンプル間で一貫しています。

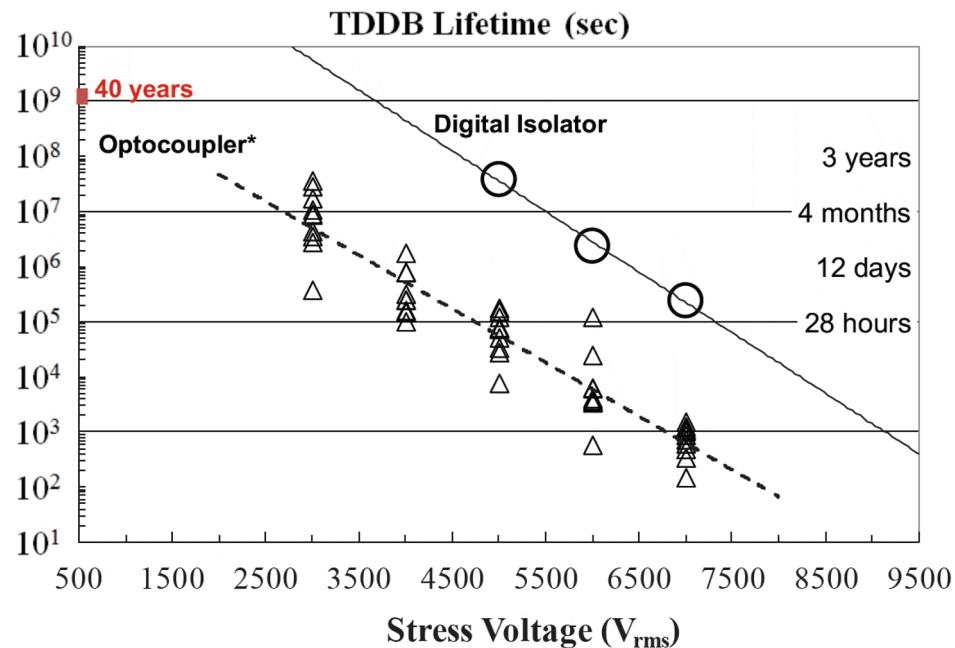


図 3-1. フォトカプラと TI のデジタル アイソレータの TDDB 寿命の比較

4 ソリューション サイズ

フォトカプラは、電気信号を光に変換し、その後電気信号に変換して絶縁を実現するという原理で動作します。これにより、絶縁に使用できる絶縁体の選択は、空気やエポキシなど光学的に透過する絶縁体に制限されます。空気とエポキシの絶縁耐力は非常に低いため、シングル チャネル パッケージではかなりのスペースを占有します。これにより、特定のフォトカプラ デバイスに収容できる最大チャネル数が制限されます。

デジタル アイソレータは SiO_2 を絶縁体として使用します。これは絶縁耐力が大幅に高く、占有面積がかなり小さいため、単一の絶縁チャネルを実現できます。そのため、複数のチャネルを小型パッケージに簡単に統合することができます。標準的なシングル チャネル フォトカプラは通常 $3.7\text{mm} \times 4.55\text{mm}$ のパッケージ サイズで供給されます。一方、SSOP パッケージを採用した [ISO7762](#) は、 $4\text{mm} \times 5\text{mm}$ という小型パッケージ面積に 6 つの高性能チャネルを搭載できます。

図 4-1 に、8 チャネルの絶縁ソリューションを実現する場合の 8 つのシングル チャネル フォトカプラ、4 つのデュアル チャネル フォトカプラ、2 つの ISO6441 デバイスの占有面積の比較を示します。この図には、幅広の SOIC-16 パッケージで最高のチャネル密度を実現している 6 チャネル デジタル アイソレータ [ISO7762](#) も横に表示されています。

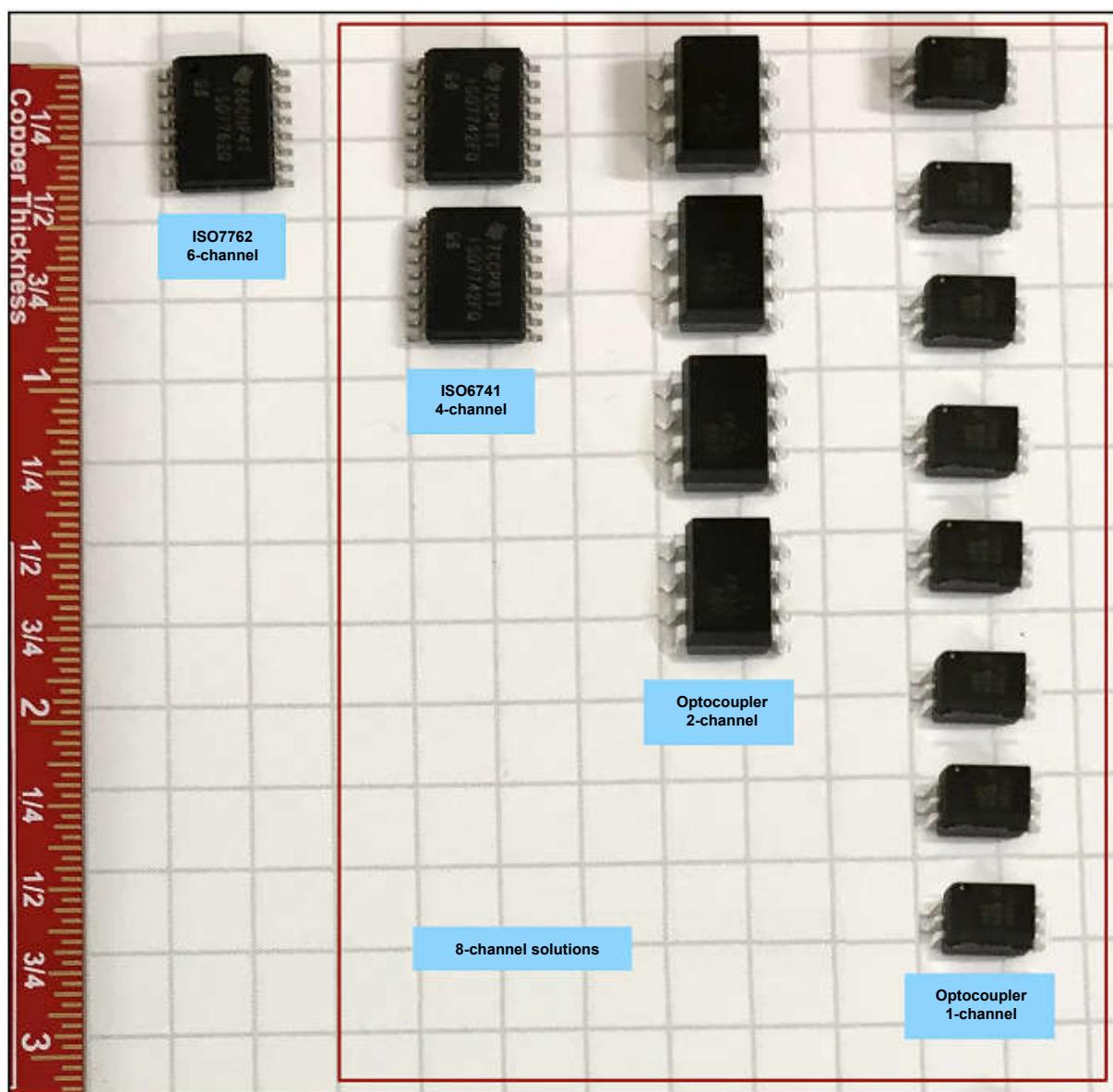


図 4-1. ISO6741 および ISO7762 によるフォトカプラ占有面積の比較

5 経年劣化および信頼性

LED の実際の光出力が経時的に劣化することはよく知られています。光出力の劣化は、フォトカプラ デバイスの多くのパラメータに影響を及ぼします。そのほとんどは、通常、データシートに記載されていません。電流伝達比 (CTR) は、経年劣化が明確に現れるパラメータの 1 つです。東芝が発行した『トランジスタ カプラの基本特性および応用回路設計』というアプリケーション ノートに、テスト時間の関数としての CTR 劣化の例が示されています。

フォトカプラの寿命のある時点では、CTR はデバイスが正常に動作しないレベルまで低下するため、信頼性の低下 (高い FIT [故障率]、低い MTBF) につながります。デジタル アイソレータの絶縁回路と制御回路は非常に適切にトリムされているため、経年劣化に起因する性能の変動を最小限に抑えることができます。経年劣化は、データシートに記載されているデバイスの最小値や最大値仕様の一部としてもすでに考慮されています。デジタル アイソレータの製造プロセスは非常によく制御されており、非常に高い信頼性 (低い FIT [故障率]、高い MTBF) も実現します。

6 同相モード過渡耐性 (CMTI)

ソーラー インバータのように、変換や制御のために非常に高い電圧がスイッチングされることで高い同相モード スイッチング ノイズが発生するアプリケーションが多くあります。また、モーター駆動のように、誘導性負荷によって高いリングング ノイズが発生するアプリケーションも存在します。アイソレータの両端に発生するこれらの同相モード ノイズが機器の内部回路に結合し、正常な動作を妨害する可能性があります。

このようなノイズが内部回路に影響を与えないようにする方法の 1 つとして、良好な同相モード ノイズ除去を備えた差動設計を実装する方法が挙げられます。フォトカプラがシングルエンド チャネル設計で、同相モード ノイズ除去回路がなければ、フォトカプラのレシーバが外部の同相モード ノイズの影響を受けやすくなります。

ファラデー シールドを内蔵している場合でも、標準的な高速フォトカプラで $\pm 20 \text{ kV}/\mu\text{s}$ の最小 CMTI にしか対応できません。これに対し、ISO6441 は差動絶縁チャネルの設計と、同相モード ノイズ除去が非常に大きいレシーバを採用しているため、 $\pm 150 \text{ kV}/\mu\text{s}$ の最小 CMTI に対応できます。

7 フォトカプラ電流入力とデジタル アイソレータ CMOS 電圧入力の比較

すべてのフォトカプラ入力は電流駆動であり、デバイスが動作するには、2mA を上回る定常バイアス電流が必要です。多くのフォトカプラでは、アプリケーションの最小性能要件を満たすために、入力電流の 10mA を上回る値が必要となります。したがって、それを任意の TTL または CMOS 出力で直接駆動することは不適切であり、そのため、フォトカプラを駆動できるバッファが必要になる場合があります。

フォトカプラは、入力電圧がわずかに変化するとフォトカプラの性能が大幅に変化する可能性があるため、低電圧デジタル回路 (3.3V 未満) と組み合わせて使用することにも適していません。ISO6441 などのデジタル アイソレータは、電圧駆動されるハイインピーダンスの CMOS 入力を備えています。CMOS 入力が消費する定常電流は最大 $\pm 10 \mu\text{A}$ であるため、外部バッファなしで、任意の TLL または COMS 出力によって直接駆動できます。これにより、マイコンや ADC などのほとんどのデジタル デバイスと直接インターフェイスできます。

また、デジタル アイソレータは多様な電源とロジック電圧レベルで動作させることができ、1.8V 低電圧動作もサポートしています。入力電源電圧やロジック電圧レベルの一部の変動も、出力ロジック電圧レベルに影響を与えません。デジタル アイソレータの入力容量 (ISO6441 の場合約 1.5pF) もフォトカプラと比較して大幅に低く (代表的な高速フォトカプラの場合約 60pF)、デジタル アイソレータはフォトカプラに比べて非常に高速かつ簡単にスイッチングできます。

8 まとめ

フォトカプラーは、データ絶縁のためにさまざまなアプリケーションで使用される最初のアイソレータの1つです。フォトカプラーは長い間業界を支配していましたが、現在の性能ニーズを満たすことができないため、その人気と導入率が急激に低下しています。今日では、さまざまなアプリケーションにおいて、フォトカプラーの代わりにデジタルアイソレータが使用される状況が急速に増加しています。性能に関する現在の業界ニーズを満たす TI のデジタルアイソレータは、フォトカプラーでは得られない要素を埋める高性能アイソレータの1つとなっています。

TI のデジタルアイソレータのさまざまな性能パラメータに焦点を当てながら、汎用フォトカプラーと高速フォトカプラーと比較しました。ここで説明するトピックのいくつかでは、アイソレータの構造、TDDB 寿命、スイッチング性能、ソリューションサイズ、経年劣化と信頼性、CMTI と CMOS 電圧入力を扱います。TI のデジタルアイソレータは、これらすべての点でフォトカプラーよりも優れた性能を発揮し、従来型のフォトカプラーに急速に取って代わりつつあります。

9 参考資料

- テキサスインスツルメンツ、『[最小サイズと最高の信頼性のために RS-485 を絶縁する方法](#)』アプリケーション概要。
- テキサスインスツルメンツ、『[スペースに制約のある産業用アプリケーション向け絶縁 CAN ポートの設計方法](#)』アプリケーション概要。
- Broadcom Inc.、『[Calculate Reliable LED Lifetime Performance in Optocouplers](#)』、2022年12月
- 東芝、『[Basic Characteristics and Application Circuit Design of Transistor Couplers](#)』、2018年2月
- テキサスインスツルメンツ、『[ISO6441 堅牢な EMC を持つ汎用クワッドチャネルデジタルアイソレータ](#)』製品ページ。
- テキサスインスツルメンツ、『[ISO6741 堅牢な EMC を持つ汎用クワッドチャネルデジタルアイソレータ](#)』製品ページ。
- テキサスインスツルメンツ、『[ISO7741 高速、堅牢な EMC 強化型、汎用クワッドチャネルデジタルアイソレータ](#)』製品ページ。
- テキサスインスツルメンツ、『[ISO7762 高速、堅牢な EMC 強化型 6 チャネルデジタルアイソレータ](#)』製品ページ。

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、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 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