

Technical White Paper

通过使用数字隔离器替代光耦合器改善系统性能



摘要

电隔离（通常简称为隔离）可以阻止直流电流和有害交流电流，并避免在系统的两个部分之间形成直流导通路。隔离执行这些操作的同时，仍允许在这两个部分之间进行信号传输和/或功率传输。提供电隔离的半导体器件称为“隔离器”。光耦合器是率先被引入半导体行业的隔离器之一，并作为专有隔离技术，几十年来一直占据着该行业的主导地位。

随着过去二十年来半导体技术的发展，许多其他隔离技术（例如电容隔离和磁隔离）也能提供与光耦合器类似的功能，并具有更好的整体性能。在众多同类技术中，TI 基于二氧化硅 (SiO_2) 的数字隔离技术可提供卓越的性能，尤其是在高额定电压、电气特性、开关特性和可靠性方面具有出色表现。本白皮书就各种性能参数将 TI 数字隔离器与一些常用的光耦合器进行了比较。如需对标准接口电路中的 TI 数字隔离器和光耦合器进行比较，请参阅[如何在标准接口电路中将光耦合器替换为数字隔离器](#)。在寻求对光耦合器设计进行可靠而稳健的升级时，请考虑 TI 的引脚对引脚 [光耦仿真器](#) 产品。

内容

1 隔离器结构.....	2
2 开关性能.....	3
3 通过 TDDb 测试预测隔离器寿命.....	5
4 解决方案尺寸.....	6
5 老化和可靠性.....	7
6 共模瞬态抗扰度 (CMTI).....	7
7 光耦合器电流输入与数字隔离器 CMOS 电压输入间的关系.....	7
8 结语.....	8
9 参考资料.....	8

插图清单

图 1-1. 典型光耦合器的结构.....	2
图 1-2. TI 数字隔离器的结构.....	2
图 3-1. 光电耦合器与 TI 数字隔离器的 TDDb 寿命.....	5
图 4-1. 比较采用 ISO6741 和 ISO7762 的光耦合器所占用的空间.....	6

表格清单

表 1-1. 各种绝缘材料的介电强度.....	2
表 2-1. 通用光耦合器与 TI 数字隔离器的时序规格.....	3
表 2-2. 高速光耦合器与 TI 数字隔离器的时序规格.....	4

1 隔离器结构

虽然数字隔离器和光耦合器的功能相似，但这些器件在结构和工作原理上有很大的不同。光耦合器使用 LED 来跨隔离（或绝缘）层（通常只是空气间隙）传输数字或模拟信息。一些光耦合器使用环氧树脂作为绝缘材料，其介电强度比空气稍好，如图 1-1 中所示。相反，数字隔离器可以采用电容隔离或磁隔离。电容式数字隔离器由两个使用 SiO_2 作为电介质的串联隔离电容器构成，如图 1-2 中所示。磁隔离利用由电介质隔开的线圈。TI 利用 SiO_2 进行电容和磁隔离，这是绝缘材料中介电强度最高的材料之一，与同类隔离技术使用的电介质相比，它的性能明显更强，如表 1-1 中所示。

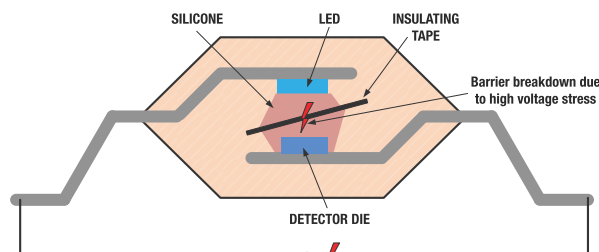


图 1-1. 典型光耦合器的结构

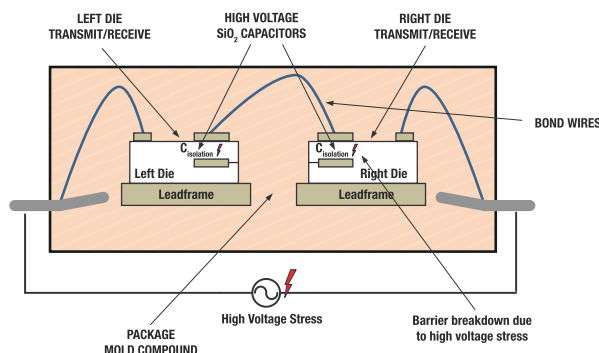


图 1-2. TI 数字隔离器的结构

表 1-1. 各种绝缘材料的介电强度

绝缘材料	介电强度
空气	约 $1\text{V}_{\text{RMS}}/\mu\text{m}$
环氧树脂	约 $20\text{V}_{\text{RMS}}/\mu\text{m}$
二氧化硅填充的模塑化合物	约 $100\text{V}_{\text{RMS}}/\mu\text{m}$
聚酰亚胺	约 $300\text{V}_{\text{RMS}}/\mu\text{m}$
SiO_2	约 $500\text{V}_{\text{RMS}}/\mu\text{m}$

2 开关性能

隔离器广泛用于许多需要对数据、控制或状态信号进行隔离的工业和汽车应用。为了能够及时处理隔离的数据、控制或状态信号，隔离器需要具有出色的开关特性，从而最大限度降低对整体系统时序性能的影响。光耦合器的开关特性非常差，而数字隔离器可以提供出色的开关特性，使更多的系统能够满足性能要求。

数据表通常不会说明通用光耦合器支持的数据速率，因此很难知道它们是否适合给定的应用。大部分光耦合器还具有集电极开路输出，因此，它们只有少数几个上拉或负载电阻特征值。TI 全新的一款数字隔离器 [ISO6441](#) 在数据表中明确指明了其支持的最大数据速率为 **150Mbps**，因此很容易知道这款器件是否适用于给定的应用。与光耦合器不同，数字隔离器不需要任何外部上拉电阻器即可运行，并且最大数据速率不会被外部元件所限制。

[表 2-1](#) 比较了通用光耦合器和 TI 数字隔离器的时序规格。此外，该表还估算了使用数据表中的时序规格可以实现的异步和同步数据速率。从[表 2-1](#) 可以看出，使用通用光耦合器实现的数据速率远低于使用数字隔离器实现的数据速率。与数字隔离器相比，光耦合器的两个上拉电阻器选件 ($R_L = 100\ \Omega$ 和 $R_L = 1.9k\ \Omega$) 会消耗更高的电流，因此不适合用于许多应用。

表 2-1. 通用光耦合器与 TI 数字隔离器的时序规格

器件型号	通用光耦合器		ISO6441	ISO6741
	$R_L = 100\ \Omega$	$R_L = 1.9k\ \Omega$	VCC = 5V	VCC = 5V
每通道的输入正向电流/ICC1 (典型值, 单位 mA)	2.0	16.0	2.2	1.8
每通道的开通状态集电极电流/ICC2 (典型值, 单位 mA)	50.0	2.6	4.5	3.2
上升时间 t_r (典型值, 单位 μs)	2.0	0.8 ⁽¹⁾	0.002	0.005
下降时间 t_f (典型值, 单位 μs)	3.0	35.0 ⁽¹⁾	0.002	0.005
开通时间/传播延迟 t_{pHL} (典型值, 单位 μs)	3.0	0.5	0.006	0.011
关断时间/传播延迟 t_{pLH} (典型值, 单位 μs)	3.0	40.0	0.006	0.011
传播延迟偏斜 t_{sk} (最大值, 单位 ns)	-	-	0.003	0.006
最大异步数据速率 ($T = \max(t_r, t_f) \times 2/0.6 + t_{sk}$), 典型值, 单位 Mbps)	0.1	0.008	80.6	47.6
最大同步数据速率 ($T = \max(t_{pHL}, t_{pLH}) \times 4$), 典型值, 单位 Mbps)	0.028	0.006	41.7	22.7

(1) 估计值

与通用光耦合器相比，高速光耦合器具有更好的开关特性。表 2-2 将典型的高速光耦合器与 TI 数字隔离器进行了比较，其中这些器件的异步和同步数据速率是使用各自数据表中给出的时序规格估算得出的。如比较表中所示，与高速光耦合器相比，数字隔离器可以支持更高的数据速率。

表 2-2. 高速光耦合器与 TI 数字隔离器的时序规格

器件型号	高速光耦合器		ISO6441	ISO6741
参数	$I_F = 14\text{mA}$	$I_F = 6\text{mA}$	$V_{CC} = 5\text{V}$	$V_{CC} = 5\text{V}$
每通道的输入正向电流/ICC1 (典型值, 单位 mA)	14.0	6.0	2.2	1.8
上升时间 t_r (典型值, 单位 ns)	15.0	15.0	2	4.5
下降时间 t_f (典型值, 单位 ns)	15.0	15.0	2	4.5
开通时间/传播延迟 t_{PHL} (典型值, 单位 ns)	33.0	40.0	6.2	11
关断时间/传播延迟 t_{PLH} (典型值, 单位 ns)	27.0	30.0	6.2	11
传播延迟偏斜 t_{sk} (最大值, 单位 ns)	30.0	30.0	3	6
最大异步数据速率 ($T = \max(t_r, t_f) \times 2/0.6 + t_{sk}$), 典型值, 单位 Mbps)	12.5	12.5	80.6	47.6
最大同步数据速率 ($T = \max(t_{PHL}, t_{PLH}) \times 4$), 典型值, 单位 Mbps)	7.6	6.3	41.7	22.7

3 通过 TDDB 测试预测隔离器寿命

时间依赖性电介质击穿 (TDDB) 测试是一种业界通用的加速应力测试，用于确定电介质寿命与电压间的函数关系。该测试会在器件的隔离栅上施加比典型工作电压更高的各种应力电压，并监测击穿电介质所需的时间。然后，将这些电压与时间的坐标绘制在适当的图上，并根据这些坐标推算更低的应力电压，从而确定适当工作电压下的预期电介质寿命。

图 3-1 将 TI 数字隔离器的 TDDB 图与常用的光耦合器进行了比较，可以了解到，光耦合器的平均 TDDB 线比数字隔离器的平均 TDDB 在对数坐标中低大约 2 格（相当于 100 倍）。两种器件的 TDDB 寿命差异巨大的主要原因在于，它们所用绝缘材料的介电强度差异很大（请参阅表 1-1）。请注意，在给定的应力电压下，光耦合器的寿命因样片不同而有很大差别，而数字隔离器各个样片的寿命是一致的。

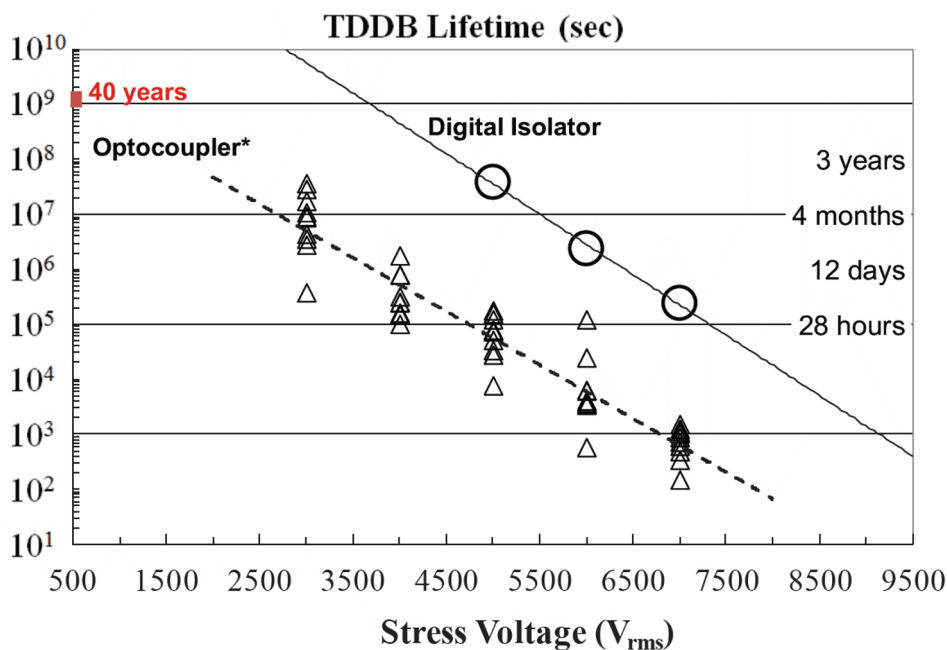


图 3-1. 光电耦合器与 TI 数字隔离器的 TDDB 寿命

4 解决方案尺寸

光耦合器的工作原理是将电信号转换为光，然后再转换回电信号，从而实现隔离。因此，可用于绝缘的电介质仅限于光学透明介质（如空气和环氧树脂）。由于空气和环氧树脂的介电强度非常低，因此它们在单通道封装中会占据相当大的空间，从而限制了每个光耦合器器件中可容纳的最大通道数。

同样，数字隔离器使用 SiO_2 作为电介质，这种介质具有明显更高的介电强度，但占用的空间非常小，可实现单个隔离通道，因此可以将多个通道轻松集成到一个小型封装中。典型的单通道光耦合器通常采用 $3.7\text{mm} \times 4.55\text{mm}$ 的封装尺寸，而采用 SSOP 封装的 **ISO7762** 则可以在 $4\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的小型封装中容纳 6 个高性能通道。

图 4-1 比较了八个单通道光耦合器和四个双通道光耦合器（每个双通道光耦合器采用两个 **ISO6441** 器件，从而实现一个八通道隔离解决方案）所占用的空间。该图旁边是六通道数字隔离器 **ISO7762**，展示了在宽体 **SOIC-16** 封装中实现的最高通道密度。

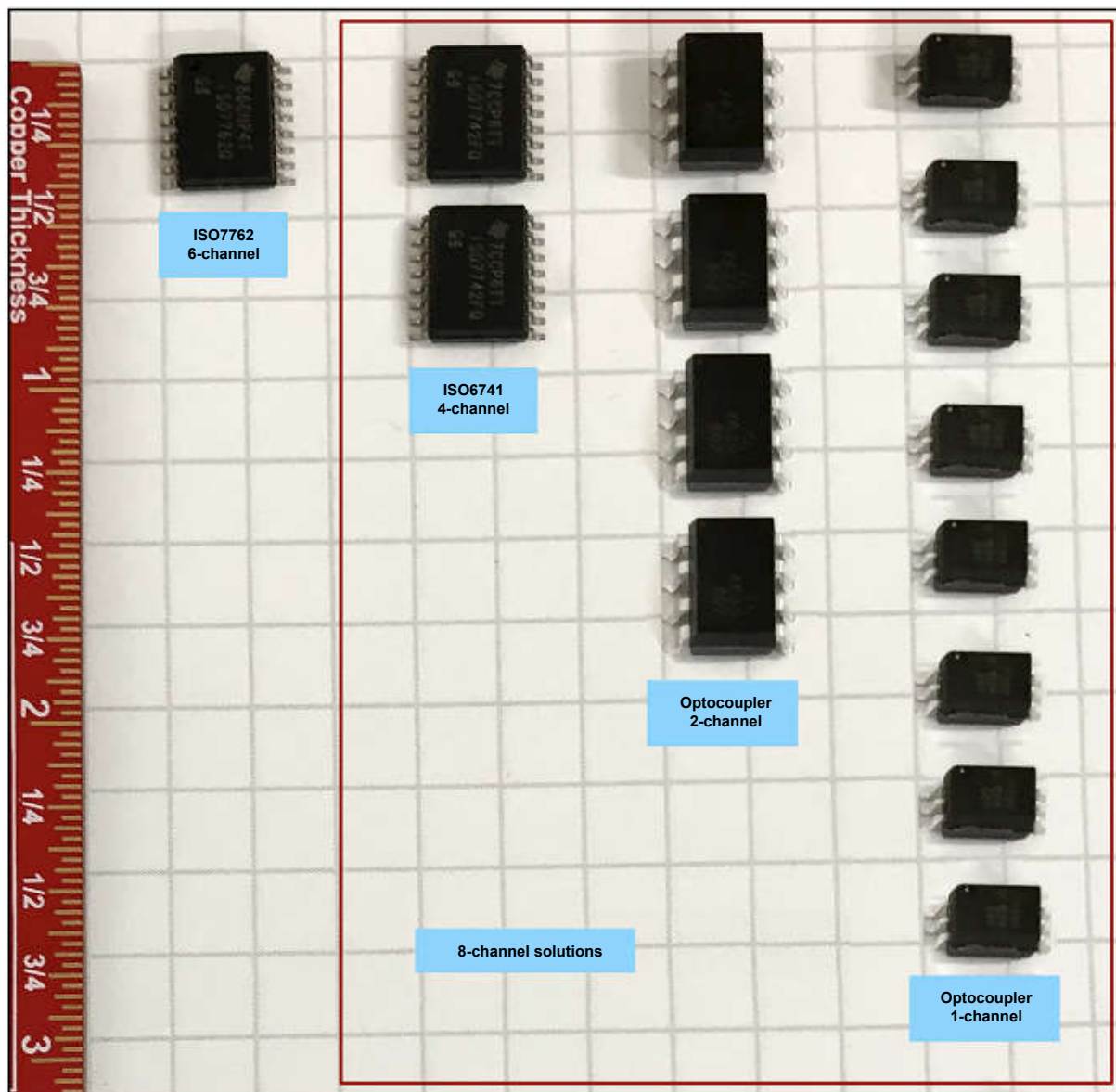


图 4-1. 比较采用 **ISO6741** 和 **ISO7762** 的光耦合器所占用的空间

5 老化和可靠性

众所周知，LED 的实际光输出会随着时间而下降。光输出的下降会影响光耦合器器件的许多参数，其中大部分参数通常在数据表中并没有提及。电流传输比 (CTR) 是一种准确表示老化现象的参数。有关 CTR 下降与测试时间之间函数关系的示例说明，详见 Toshiba 的应用手册 [Basic Characteristics and Application Circuit Design of Transistor Couplers](#)。

在光耦合器使用寿命的某个时刻，CTR 会下降到器件无法正常运行的水平，从而导致可靠性降低（时基故障率高且 MTBF 短）。与光耦合器不同，数字隔离器的隔离和控制电路通过良好调整，最大限度降低老化对性能的影响。器件数据表也在最小值和最大值规格中增加了老化参数。数字隔离器的制造工艺受到严格控制，因此可实现超高的可靠性（时基故障率低且 MTBF 长）。

6 共模瞬态抗扰度 (CMTI)

许多应用（例如光伏逆变器）在转换或调节时具有很高的开关电压，会导致高共模开关噪声，还有其他应用（例如电机驱动器）具有感性负载，会导致高振铃噪声。在隔离器上出现的这些共模噪声可能会耦合到器件的内部电路中，并破坏正常运行。

为防止此类噪声对内部电路造成影响，可采用的一种方法是实现具有良好共模噪声抑制能力的差分设计。光耦合器采用单端通道设计，无共模噪声抑制电路，因此其接收器易受外部共模噪声的影响。

即使采用内部法拉第屏蔽，典型的高速光耦合器支持的最低 CMTI 也仅为 $\pm 20\text{kV}/\mu\text{s}$ 。相比之下，ISO6441 采用差分隔离通道设计并搭载共模噪声抑制能力很高的接收器，因此其最低 CMTI 为 $\pm 150\text{kV}/\mu\text{s}$ 。

7 光耦合器电流输入与数字隔离器 CMOS 电压输入间的关系

所有光耦合器输入都是由电流驱动的，需要大于 2mA 的稳定偏置电流才能使器件工作。许多光耦合器可能需要大于 10mA 的输入电流才能满足基本的应用性能要求。因此，光耦合器不太适合直接由 TTL 或 CMOS 输出进行驱动，而是需要一个缓冲器来驱动。

光耦合器也不适合用于低压数字电路（低于 3.3V），因为光耦合器的性能会随着输入电压的细微改变而急剧变化。ISO6441 等数字隔离器可以提供由电压驱动的高阻抗 CMOS 输入。CMOS 输入消耗的最大稳定电流为 $\pm 10\mu\text{A}$ ，因此可以直接由 TLL 或 COMS 输出进行驱动，而无需任何外部缓冲器。因此，这类器件具有更好的兼容性，可直接与大多数其他数字器件（例如 MCU、ADC 等等）连接。

数字隔离器还可以在各种不同的电源和逻辑电压电平下工作，而且支持 1.8V 低压运行。另外，输入电源电压或逻辑电压电平的一些变化不会对输出逻辑电压电平造成影响。数字隔离器的输入电容（ISO6441 大约为 1.5pF）远远低于光耦合器的输入电容（典型的高速光耦合器大约为 60pF），因此前者的开关切换比后者更快、更容易。

8 结语

光耦合器是最早应用于各种数据隔离应用的隔离器之一。它们有很长一段时间在业界占据了主导地位，但由于无法满足当前的时间性能需求，它们的受欢迎度和接受度正急剧下降。数字隔离器在各种应用中迅速取代光耦合器，而 TI 的高性能数字隔离器弥补了光耦合器的短板，满足当前行业内的性能需求。

人们了解 TI 数字隔离器的各种性能参数后，将其与通用型和高速光耦合器进行比较。主要关注的是隔离器结构、TDDDB 寿命、开关性能、解决方案尺寸、老化和可靠性、CMTI 和 CMOS 电压输入等特性。结果表明，TI 数字隔离器在所有这些方面都优于光耦合器，并且正在迅速取代传统的光耦合器。

9 参考资料

- 德州仪器 (TI), [如何隔离 RS-485 以实现超小尺寸和超高可靠性](#) 应用简报。
- 德州仪器 (TI), [如何为空间受限型工业应用设计隔离式 CAN 端口](#) 应用简报。
- Broadcom Inc., [Calculate Reliable LED Lifetime Performance in Optocouplers](#), December 2022
- Toshiba Corporation, [Basic Characteristics and Application Circuit Design of Transistor Couplers](#), February 2018
- 德州仪器 (TI), [EMC 性能优异的 ISO6441 通用四通道数字隔离器](#) 产品页面。
- 德州仪器 (TI), [EMC 性能优异的 ISO6741 通用四通道数字隔离器](#) 产品页面。
- 德州仪器 (TI), [EMC 性能优异的 ISO7741 高速、增强型和基础型四通道数字隔离器](#) 产品页面。
- 德州仪器 (TI), [EMC 性能优异的 ISO7762 高速、增强型六通道数字隔离器](#) 产品页面。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月