

Application Note

光耦仿真器简介



Manuel Chavez

Saminah Chaudhry

Luke Trowbridge

摘要

德州仪器 (TI) 的光耦仿真器融合了传统光耦合器的行为和 TI 基于二氧化硅 (SiO_2) 的隔离技术。尽管数字信号隔离器具有更优的隔离性能，但由于光耦合器输入和输出的模拟特性，因此数字信号隔离器无法直接取代所有电路中的光耦合器。光耦仿真器通过提供等效的输入和输出信号行为，同时提供与业界常用光耦合器的引脚对引脚封装兼容性，有助于无缝集成到现有设计中。从系统设计工程师的角度来看，这些产品看起来就像光耦合器，但利用了 TI 在仿真输入和输出电路方面的专业知识以及 TI 的 SiO_2 隔离栅技术。为什么要制造这样的半导体产品？答案很简单：为设计人员提供两全其美的选择。

内容

1 简介	2
2 什么是光耦合器？	2
3 什么是光耦仿真器？	4
4 使用光耦仿真器的经典电路	5
4.1 使用 ISOM811x 的典型隔离式电源应用	6
4.2 使用 ISOM871x 实现高速信号隔离	6
4.3 使用 ISOM8610 的 CAN 端接	7
5 总结	8
6 参考文献	8
7 修订历史记录	9

插图清单

图 2-1. 光耦合器横截面	2
图 3-1. 光耦合器 (左) 和光耦仿真器 (右) 的功能比较	4
图 3-2. 光耦仿真器的横截面	4
图 3-3. 基于开关键控的调制方案	5
图 4-1. 使用 ISOM811x 的典型隔离式电源应用	6
图 4-2. 使用 ISOM8710 的隔离式 CAN 应用	7
图 4-3. 使用 ISOM8710 的隔离式 RS-485N 应用	7
图 4-4. 使用 ISOM8610 的典型软件控制端接	8

表格清单

表 3-1. 各种绝缘材料的介电强度	4
--------------------	---

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

电气隔离可以阻止系统的两个部分之间形成干扰直流 (DC) 和交流 (AC)，同时仍支持在这两个部分之间进行信号和电力传输。为了确保电气安全，以及在故障情况下保护敏感电路，保护操作人员和低压电路免受高压影响，提高抗噪能力并安全地承受通信电路之间的接地电位差，各种应用中都需要信号和电源隔离。

光耦合器又称为光电耦合器、光电隔离器和光隔离器，被大多数设计工程师认为是实现系统信号电隔离的常见设计。由于光耦合器是半导体行业最早引入的隔离器之一，并且自 20 世纪 70 年代以来就已出现，因此在为大多数工业终端设备提供基本和增强型安全隔离方面，光耦合器已经并将继续发挥关键作用。尽管在过去的 50 年里，光耦合器技术取得了显著的进步，但其在电气特性、高压可靠性和集成额外系统功能方面，似乎已经达到了一定的瓶颈。这个问题使得设计人员不得不寻找替代设计，以满足迅速发展的系统需求。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。TI 基于二氧化硅 (SiO_2) 的数字隔离技术便是其中之一。自 21 世纪初以来，TI 就一直在投资改进该技术。此前，该技术已被用于设计和发展品类丰富的数字隔离器产品系列。虽然数字隔离器和光耦合器都提供隔离功能（例如，允许进行信号通信，同时阻止高压并防止接地回路），但这两种隔离器类型有很多差异，系统设计工程师必须加以考虑。

2 什么是光耦合器？

光耦合器是一种隔离器件，其中包含一个发光元件和一个光敏元件，用于传输信号，同时阻断它们之间的接地电位差 (GPD)。发光元件通常是发光二极管 (LED)，而光敏元件通常是光晶体管或光电二极管。

为了使光耦合器实现信号隔离，其内部的 LED 和光晶体管（或光电二极管）通过距离和绝缘材料进行物理隔离。这里的绝缘材料可以是环氧树脂或模塑化合物，也可以只是空气间隙：这三种材料都具有相对较低的介电强度属性，可实现电压绝缘。图 2-1 展示了光耦合器的横截面图：

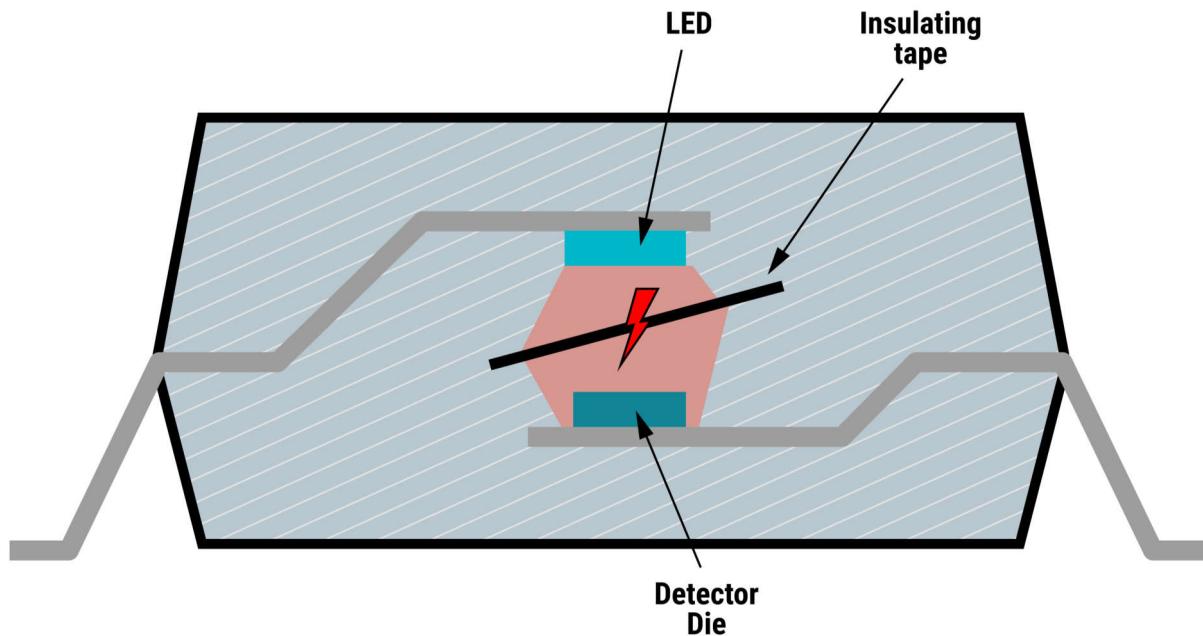


图 2-1. 光耦合器横截面

随着时间的推移，通过光耦合器的信号传输性能会因 LED 的老化以及所用半透明隔离材料的浑浊或泛黄而降低。随着 LED 老化变暗或环氧树脂老化发黄，透射光线的强度会逐渐减弱；因此，需要更大的电流来驱动 LED 输入，以达到光耦合器为新的亮度。如果系统设计人员不对这种信号传输衰减进行补偿，光耦合器将输入信号传输到隔离输出的能力最终会达到临界点，甚至完全失效。为了应对这个问题，除了要考虑数据表规格外，大多数光耦合器还要求设计中包括一个输入电流保护带，以便 LED 能够在整个使用寿命内更好地传输信号。这种额外的输入电流会导致光耦合器和整个系统从设计的一开始就产生更高且可能不必要的功耗。

在正常运行期间，隔离器件任一侧的高压摆率或高频瞬变都可能会破坏通过隔离栅进行的数据传输。共模瞬态抗扰度 (CMTI) 是两个隔离电路之间所施加共模电压的最大容许上升或下降速率，通常以 dv/dt 来测量，单位通常为 $kV/\mu s$ 或 V/ns 。CMTI 是一个关键的信号完整性参数，与所有隔离信号器件的隔离信号鲁棒性相关，而隔离信号器件会受到两个单独接地基准之间的差分电压影响。随着新一代功率半导体器件的不断进步并得到采用，客户终端设备和应用需要更快的开关频率和更高的幅度。大多数高速数字光耦合器的 CMTI 规格最大值为 $25kV/\mu s$ 。由于 CMTI 最大值如此之低，因此在接地层之间的快速共模瞬变期间，例如在电源或逆变器应用中的晶体管开关期间，数字光耦合器的输出信号中会出现毛刺。由于这一原因，光耦合器通常不用于需要快速开关高密度电源应用的场合。

许多常用的光耦合器以其二极管输入和晶体管输出特性而闻名，使用这些光耦合器时，输出晶体管灌入的电流与流经输入 LED 的电流成正比。用于量化此属性的参数称为电流传输比 (CTR)，定义为通过晶体管的输出电流 (I_C) 与通过输入 LED 的输入电流 (I_F) 之比，以百分比表示。随着时间、温度和湿度的变化，大多数光耦合器的 CTR 值可能会发生显著变化。与 LED 老化的情况类似，这意味着为了确保足够高的输出驱动强度来实现正确的信号传输，系统设计人员必须考虑最坏情况下的变化并相应地增加输入正向电流。这也会导致光耦合器出现不想要甚至可能是不必要的功耗。

3 什么是光耦仿真器？

德州仪器 (TI) 的光耦仿真器融合了传统光耦合器的行为和 TI 基于 SiO_2 的隔离技术。如 图 3-1 所示，光耦仿真器与业内最常见的光耦合器引脚对引脚兼容，有助于无缝集成到现有设计中，同时提供相同的输入和输出信号行为。

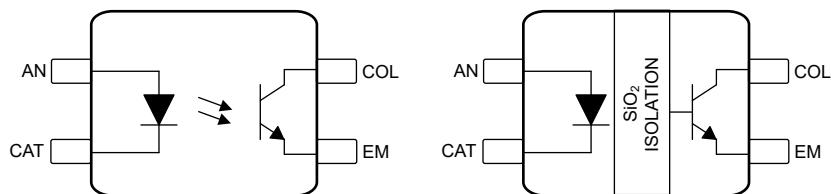


图 3-1. 光耦合器 (左) 和光耦仿真器 (右) 的功能比较

图 3-1 是 TI 光耦仿真器的横截面图，其中展示了包含输入、隔离和输出电路的三个裸片。

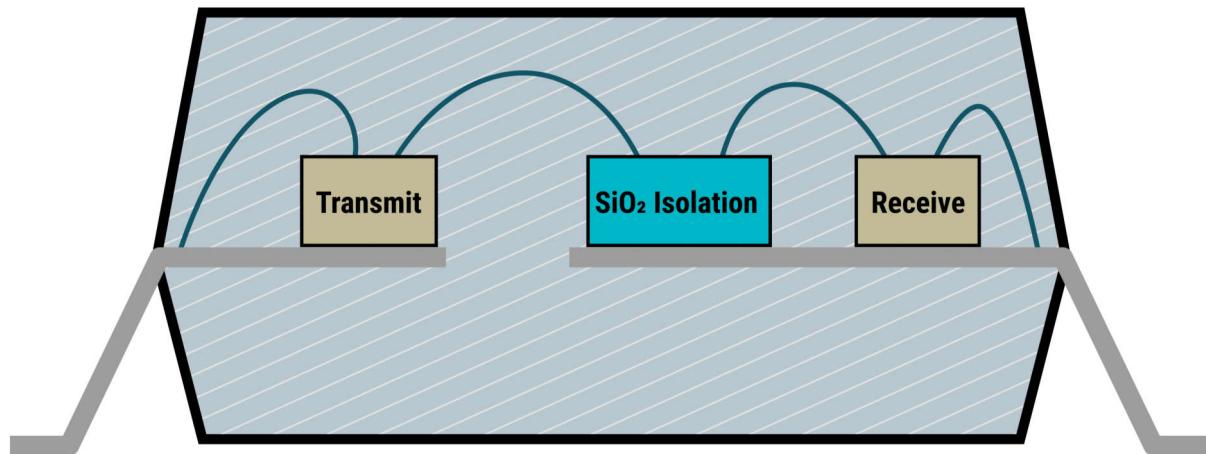


图 3-2. 光耦仿真器的横截面

表 3-1 比较了光耦合器中通常使用的各种不同绝缘材料与 TI 光耦仿真器中所用的 SiO_2 的介电强度。光耦仿真器具有更出色的高电压能力，因此非常适合需要稳健隔离的应用。TI 的光耦仿真器采用 SiO_2 作为绝缘栅，其介电强度远高于市场上许多光耦合器中使用的空气和材料。要详细了解 TI SiO_2 技术及其可靠性，请参阅 [利用可靠且性价比高的隔离技术应对高压设计挑战](#)。

表 3-1. 各种绝缘材料的介电强度

绝缘材料	技术	介电强度
空气	光学耦合器	约 $1\text{V}_{\text{RMS}}/\mu\text{m}$
环氧树脂	光学耦合器	约 $20\text{V}_{\text{RMS}}/\mu\text{m}$
二氧化硅填充的模塑化合物	光学耦合器	约 $100\text{V}_{\text{RMS}}/\mu\text{m}$
SiO_2	光耦仿真器	约 $500\text{V}_{\text{RMS}}/\mu\text{m}$

TI 的光耦仿真器在输入引脚上复制 LED 的行为，因此输入电路的信号传输和电气参数与光耦合器类似。但是，光耦仿真器内部没有实际的 LED，这带来了以下几个优势：

1. 由于光耦仿真器内部没有用于信号传输的 LED，也没有会随时间的推移而变得浑浊或变黄的透明绝缘材料，因此使用 TI 的光耦仿真器时，不需要额外的功率来像光耦合器那样在其整个使用寿命内补偿这种性能下降。由于光耦仿真器不使用 LED 传输信号，因此这种过裕度设计做法并不适用。TI 光耦仿真器的信号传输、功耗和其他运行参数都是针对其整个使用寿命指定的，并且已经考虑了工艺、电压和温度变化。
2. ISOM871x 系列器件是 TI 的首款高速光耦仿真器，以现有的数字隔离器技术为基础，具有 $125\text{kV}/\mu\text{s}$ 的最低 CMTI 规格，比一些传统的光耦合器超过了 $100\text{kV}/\mu\text{s}$ ！因此，光耦仿真器可用于具有超高共模开关噪声或高振铃幅度的应用，而传统的光耦合器无法用于这些应用。
3. 在隔离式电源的反馈控制环路等典型应用中，光耦合器的 CTR 变化会影响电源反馈环路响应，使反馈环路设计变得复杂，并且由于需要考虑提供适当的补偿，因此给系统设计人员带来了挑战。ISOM8110 等 TI 光耦仿真器标配各种窄 CTR 范围，在整个寿命和温度范围内具有更高的稳定性。
4. 典型的高速光耦合器支持 100kbps 至 1Mbps 的数据速率，而 ISOM8710 和 ISOM8711 能够以高达 25Mbps 的速率跨隔离栅传输数据。这可以实现更高的吞吐量并在更多的高速应用中使用。
5. 传统的 OptoMOS 应用需要快速开关和低功耗。德州仪器 (TI) 的新型光电仿真器，即 ISOM8610，能够以更长的使用寿命和强大的隔离性能来满足这些设计需求。
6. 许多光耦合器只能在高达 $+85^\circ\text{C}$ 的温度下工作。TI ISOM871x 系列器件的额定工作温度范围为 -40°C 至 $+125^\circ\text{C}$ ，这意味着其数据表规格参数涵盖许多高速光耦合器不适用的条件。TI 的 ISOM811x 系列光耦仿真器支持 -55°C 至 $+125^\circ\text{C}$ 的扩展工作温度范围。

TI 的光耦仿真器与其数字隔离器非常相似，可实现信号隔离。光耦仿真器中的仿真是指通过使用 TI 的隔离技术来隔离信号，同时重新创建像光耦合器一样运行的输入和输出结构。

标准光耦合器使用 LED 作为输入级。当输入端使二极管导通时，这些 LED 会随着输入正向电流的增加而变亮。LED 发出的光通过空气或环氧树脂间隙照射到封装内部的光晶体管上，然后光晶体管在输出侧灌入电流。这是光耦合器的核心操作，其中隔离栅是指 LED 和光晶体管之间的空气间隙或环氧树脂间隙，并且可以在输入或输出周围设计额外的电路，以创建交流输入或逻辑、TRIAC 或栅极驱动器输出。

在光耦仿真器中，输入信号使用开关键控 (OOK) 调制方案通过隔离栅进行传输。发送器通过隔离栅发送高频载波来表示一种数字状态，而不发送信号则表示另一种数字状态。模拟光耦仿真器中的信号传输功能与这类似，接收器在高级信号调节后对信号进行解调并通过输出级产生信号。OOK 调制方案的概念如图 3-3 中的波形所示。

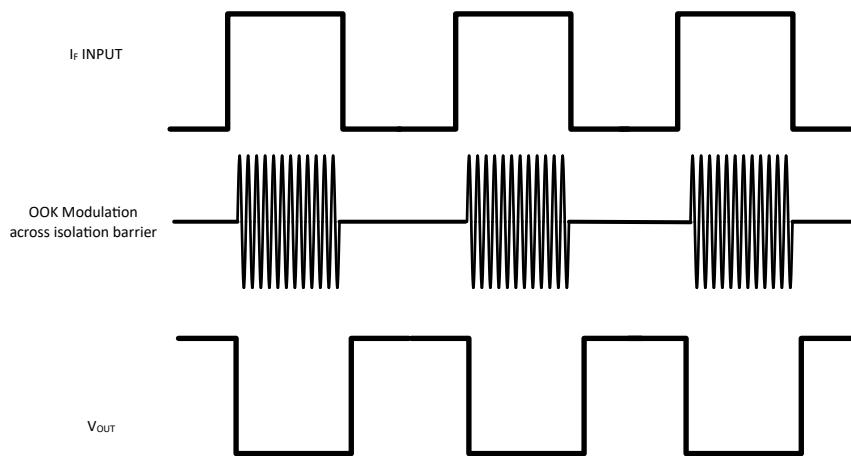


图 3-3. 基于开关键控的调制方案

4 使用光耦仿真器的经典电路

TI 的光耦仿真器设计为对现有原理图中的光耦合器元件进行引脚对引脚升级。过去使用光耦合器的电路现在可以升级为使用光耦仿真器并保留熟悉的功能，同时增强性能、可靠性和安全性。本节展示了使用光耦仿真器的典型电路示例。

4.1 使用 ISOM811x 的典型隔离式电源应用

ISOM811x 光耦仿真器具有模拟输出行为，旨在取代通常用于在隔离式电源的反馈控制环路中传输隔离信号的光耦合器。这些电源中使用变压器（例如反激式转换器）来将输出电压与主输入电压隔离开来。对于模拟电源单元，控制器 IC 通常位于变压器的初级侧，而对于闭环控制，会测量次级侧的输出电压并反馈回初级侧的控制器以进行调节。要隔离此模拟反馈控制信号，最常用的方法是使用模拟输出光耦合器（本例中被 **ISOM8110** 取代）、误差放大器（通常为 **TL431**）和电压比较器来跨隔离栅形成反馈环路。

图 4-1 展示了一个典型的隔离式电源。在此实现中，输出电压由误差放大器通过电阻分压器进行感测。根据感测到的电压电平，**TL431** 可以将 ISOM811x 的电流驱动到更高或更低的水平，然后与电压基准进行比较。信息通过 ISOM811x 跨隔离栅传递到初级侧，其中 PWM 控制电路会调制功率级以调节输出电压。**TL431** 和 ISOM811x 在稳定的反馈和控制环路中发挥着重要作用。

由于 CTR 在 -55°C 至 125°C 的宽温度范围内保持稳定，因此与常用的光耦合器相比，ISOM811x 器件可改善瞬态响应、可靠性和稳定性，从而可以提供小巧、低成本、高度可靠且简单的设计，如 [隔离电源中的反馈信号](#) 产品概述中所述。

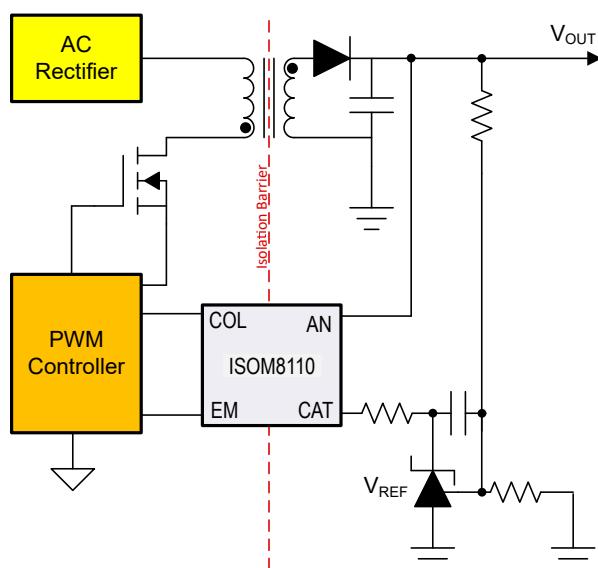


图 4-1. 使用 ISOM811x 的典型隔离式电源应用

4.2 使用 ISOM871x 实现高速信号隔离

串行通信接口通常用于在工业和汽车系统中的两个或以上设备之间发送和接收数据。对于数字应用，短距离板内通信中使用的常见接口类型有 **UART**、**SPI** 和 **I2C**。在这些应用中使用时，由于传统光耦合器具有低数据速率功能和高传播延迟，因此往往会限制数据吞吐量。

ISOM8710 和 **ISOM8711** 等 TI 的数字光耦仿真器器件具有高数据传输速率，可用于打造隔离式高速通信系统，以便在 **MCU** 和 **FPGA** 等控制器器件与传感器、数据转换器和不同电压域中的其他控制器之间可靠地传输 **SPI**、**UART**、**I2C** 和 **I/O** 信号。与收发器器件配合使用时，ISOM871x 器件也可用于完成 **CAN** 和 **RS-485** 等隔离式接口的设计，如图 4-2 和图 4-3 中所示。

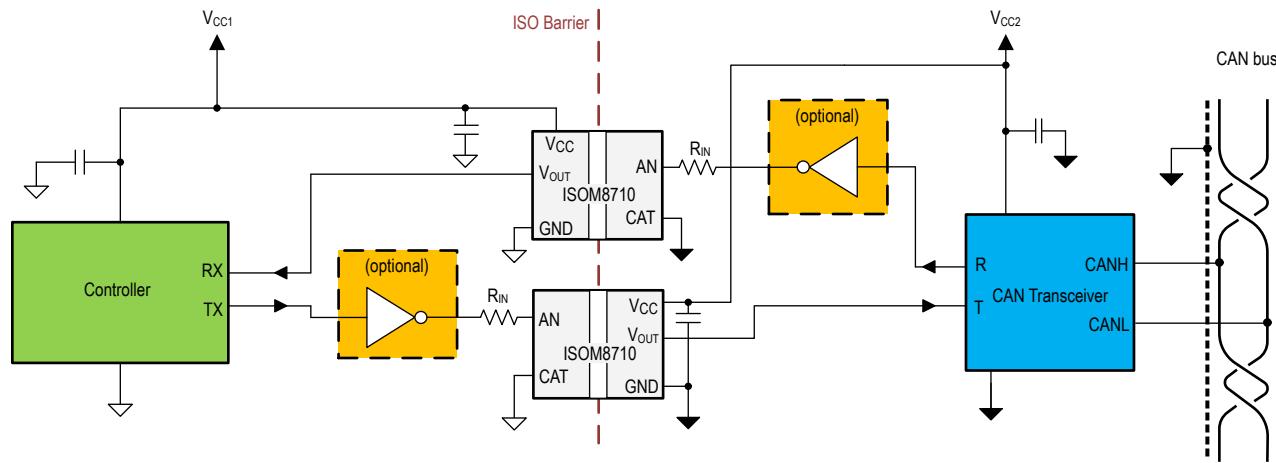


图 4-2. 使用 ISOM8710 的隔离式 CAN 应用

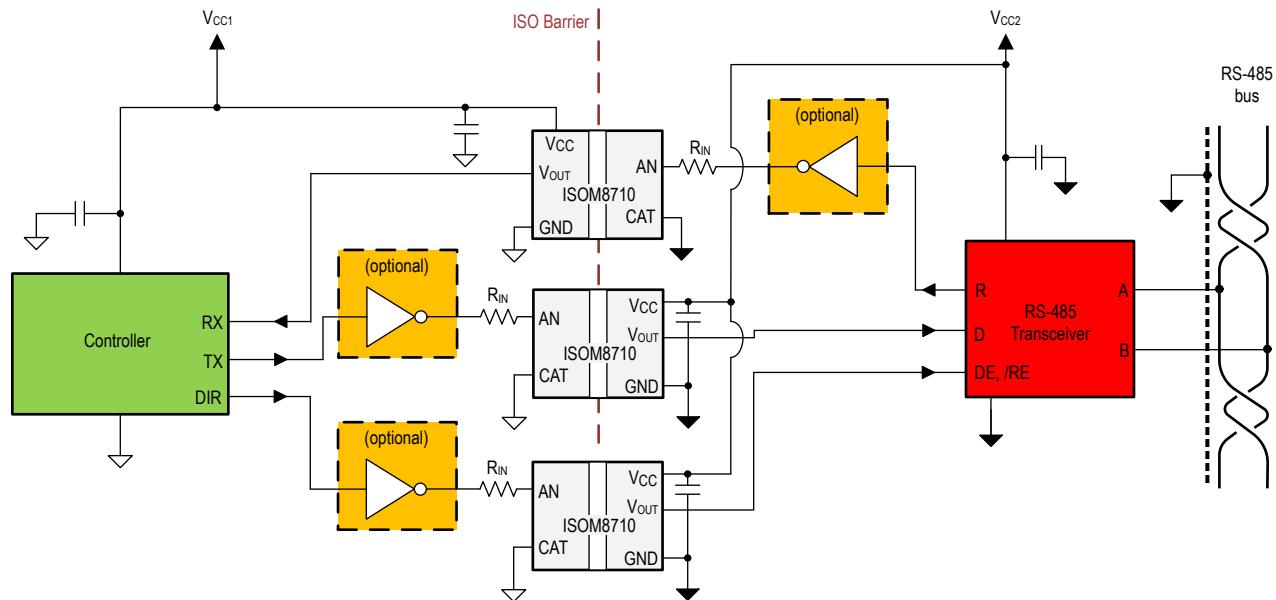


图 4-3. 使用 ISOM8710 的隔离式 RS-485 应用

4.3 使用 ISOM8610 的 CAN 端接

可在 CAN 节点设计应用中使用 ISOM8610 等光耦仿真开关。ISOM8610 在 CAN 总线上实现软件可配置的端接，在可以持续添加新节点的网络中需要该端接。此设计可以通过 MCU 的 GPIO 驱动 TERM 为高电平或低电平（在 LED 仿真器引脚上使用适当的限流串联电阻器），从而启用或禁用 CANH-CANL 之间的端接。

借助这种架构，通过灵活地启用/禁用节点，无需更改硬件，即可在 CAN 总线中实现 60Ω 有效端接。有关隔离式 CAN 总线设计的几大设计问题 应用手册包含针对隔离式 CAN 总线设计问题的优选解决方案。最后，ISOM8610 在建议运行条件下使用时可用作 $80V$ 隔离开关。

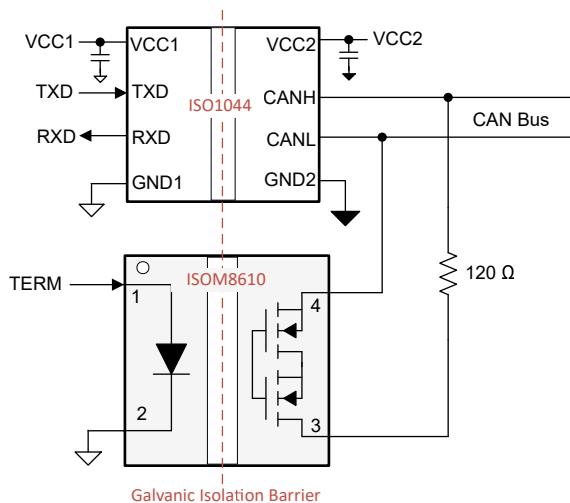


图 4-4. 使用 ISOM8610 的典型软件控制端接

5 总结

光耦合器是实现系统信号电隔离的一种常见设计。光耦合器内部用于传输信号的发光元件和光敏元件对温度和时间很敏感，其性能会随工作温度和时间的变化而发生很大变化。由于存在这些元件，光耦合器也往往具有更慢的响应时间、更高的功耗和更低的数据速率。随着近几十年来半导体技术的进步，TI 开发出了光耦仿真器，该器件具有与光耦合器类似的功能，但功耗更低，CMTI 和 CTR 更高，数据速率和带宽更高，工作温度范围更宽且隔离寿命更长。

请参阅 [TI 的交叉参考搜索工具](#)，立即查找设计中现有光耦合器的最佳光耦仿真器升级方案！

6 参考文献

- 德州仪器 (TI)，[利用可靠且性价比高的隔离技术应对高压设计挑战](#)白皮书。
- 德州仪器 (TI)，[ISOM8710](#)产品文件夹和数据表。
- 德州仪器 (TI)，[ISOM8110](#)产品文件夹和数据表。
- 德州仪器 (TI)，标准光耦合器电路产品概述。
- 德州仪器 (TI)，[隔离电源中的反馈信号](#)产品概述。
- 德州仪器 (TI)，[TI 交叉参考工具](#)。

7 修订历史记录

Changes from Revision * (September 2023) to Revision A (June 2024)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1

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出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