

具有热插拔功能和 IEC ESD 功能的隔离式 I²C 缓冲器如何改进隔离式 I²C ?



Manuel Chavez
Tarunvir Singh
Adrish Chatterjee

Applications Engineer, Isolation
Design Engineer, Isolation
Analog Engineer, Isolation

摘要

尽管集成电路总线 (I²C 或 I2C) 通信标准是当今电子系统 (包括航空航天、汽车、个人电子产品和工业应用) 中使用最广泛的芯片间通信标准之一, 但并不是每个人都知道具有热插拔功能的 I2C 器件可以防止信号错误。如果在系统中添加或移除不具备热插拔功能的 I2C 节点和器件, 则可能会在操作期间突然导致通信错误, 从而可能导致位错误, 进而可能导致数据丢失、数据损坏甚至系统故障。

I2C 是一种漏极开路、集电极开路通信标准, 因此连接到 I2C 总线的每个 I2C 器件都将输出开关 (或 FET) 的漏极从其 I2C 引脚、SDA 和 SCL 连接到 I2C 总线。如果在 I2C 系统中添加或更换器件时没有停止、关闭或重新启动系统, 则会在器件内引起瞬态。如果该瞬态足够快或足够强, 则可能会耦合到内部开关中, 导致 FET 瞬间导通, 进而使总线放电, 并可能对 I2C 总线上的其他器件显示为有效数据信号 (数据损坏)。防止发生这种情况通常意味着在添加或更换不支持热插拔的器件时通过 I2C 通信的系统需要断电或重新启动, 但在某些应用 (例如通信、数据存储和网络服务器) 中, 未提供断电选项。

内容

1 什么是隔离式 I ² C ?	2
2 什么是热插拔 ?	2
3 热插拔隔离式 I ² C 的优势	3
4 当今如何实现热插拔功能	3
5 借助 ISO164x 的内置热插拔功能实现稳健的通信	7
6 采用 ISO164x 的简化系统级 ESD 保护设计	7
7 结论	7
8 参考文献	8
9 修订历史记录	8

插图清单

图 1-1. 双向 I2C 隔离通道的简化原理图	2
图 4-1. 热插拔应用中使用的交错公连接器示例	3
图 4-2. 无引脚预充电的常规 I2C 器件在插入期间对 3.3V 总线施加负载, 使其电压降至 1.2V	4
图 4-3. ISO1640 中的引脚预充电在热插拔插入期间对总线施加负载, 使其电压降至 2.3V	4
图 4-4. 常规 I2C 器件在插入期间破坏总线通信	5
图 4-5. 热插拔 ISO1640 在插入期间保持总线的通信完整性	5
图 4-6. 当一个常规 I2C 器件的总线侧电源悬空时, 该器件将 I2C 总线从 3.3V 钳位至大约 2V	6
图 4-7. 如果 ISO1640 的 Vcc2 电源悬空, I2C 总线不受影响	6
图 6-1. 针对 I2C IEC ESD 的分立式瞬态保护	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 什么是隔离式 I²C ?

I²C 可帮助控制器与传感器、数据转换器和其他附近的集成电路 (IC) 进行通信。利用 TI 的 ISO1640 和 ISO1641 等与隔离式 I²C 兼容的信号隔离器，可以在物理距离较远、在不同本地电压电位下运行且需要隔离保护以确保正常运行或安全的系统中使用该协议。

当与**隔离式电源**一起使用时，TI 的数字隔离器可以保护敏感系统或需要针对大直流和交流电流、接地电位差和高压事件提供保护的系统。尽管大多数数字隔离器件在一个方向上隔离信号以通过隔离栅进行通信，但 TI 的双向信号隔离器可隔离 I²C 的双向信号。如图 1-1 所示，这些隔离器通过在内部组合两个穿越业界极强的二氧化硅 (SiO₂) 隔离栅的单向信号路径来实现该功能。

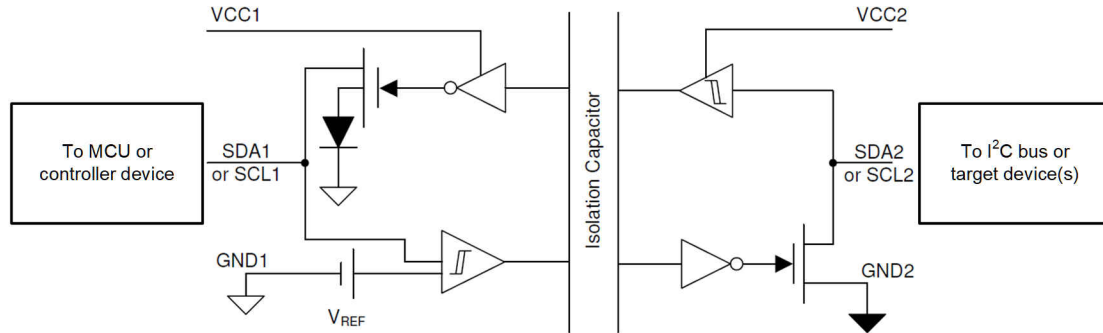


图 1-1. 双向 I²C 隔离通道的简化原理图

双向通信是 I²C 的固有功能，使用具有集成双向线路的隔离器具有以下优势：分立元件数量少，尺寸小，系统范围内的变化较小，以及对分立解决方案提供内置保护。

2 什么是热插拔 ?

热插拔是指在不暂停、重新启动系统或关闭系统电源并保持正常运行的情况下为已加电的系统更换或添加元件。保持 I²C 总线的正常运行包括不因向总线添加负载或破坏正在进行的位流而影响通信。当 I²C 节点或器件首次连接到系统时，没有电源将内部 I²C 输出 FET 的栅极接地，如果这些引脚漏极上的上电瞬态足够快，则可能会耦合到这些输出 FET 的栅极中，从而将栅极电压提升得足够高，瞬间使开关导通。这进而可能使总线电压电平降至足以超越不同器件的高/低阈值的水平，从而导致总线上出现通信错误或数据损坏。

热插拔功能有助于在更换节点或器件时保持 I²C 总线的通信完整性，使其最有利于必须在运行时进行维护或升级的高可靠性或零停机时间系统。热插拔器件必须保护敏感元件免受电击，因此使用未设计为热插拔或部分热插拔（而非完全热插拔）的元件可能会导致瞬间错误，并可能导致硬件故障或损坏。为了在具有多个可移除节点或模块的系统中发生热插拔事件期间保持通信，每个可移除节点都必须能够在不影响任何相邻节点运行的情况下移除和更换，无论电源电平和总线活动如何都是如此。

3 热插拔隔离式 I²C 的优势

数字信号隔离可保护低电压、逻辑电平子系统免受中高电压传感器、传动器和瞬态事件的影响。在电缆较长的系统或噪声较大的环境中，可能会发生高压瞬态并损坏低压电路。与 I²C 兼容的数字隔离器（如 ISO1640 和 ISO1641）有助于保护低压电路免受高电压影响，其热插拔功能融合了添加或移除 I²C 节点时的总线可靠性和针对意外电压漂移的隔离保护。

根据设计，ISO1640 和 ISO1641 隔离式 I²C 器件具有完全的“热插拔”合规性，有助于防止常见的故障模式使用不具有以下热插拔功能的常规 I²C 器件：

1. 插入器件时由于瞬态而导致数据损坏
2. 如果电源不存在，则在每次从低到高总线转换时向总线添加负载（部分热插拔器件可以）
3. 如果器件具有非失效防护 ESD，则由于寄生泄漏路径而导致 I²C 总线上的过高电压出现在本地电源轨上

下一节将举例说明 TI 的完全热插拔 I²C 器件如何优于其他器件以防止上述某些故障模式。

4 当今如何实现热插拔功能

当今敏感的高速串行通信器件并非都支持热插拔功能。在必要的隔离式 I²C 总线中，热插拔通常在连接点采用交错引脚设计来实现，这可确保在进行其他连接之前可靠地连接接地端和本地电源。图 4-1 显示了一个交错公连接器示例。

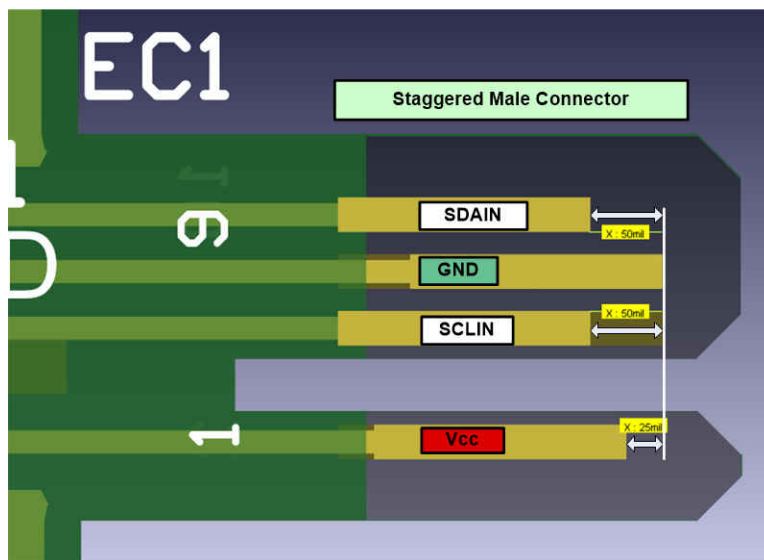


图 4-1. 热插拔应用中使用的交错公连接器示例

一些 I²C 隔离器件使用交错连接器或热插拔控制器与“上电热插拔”兼容，这意味着使用这些器件的 I²C 节点只有在连接期间器件的总线侧电源 (V_{CC}) 电平始终高于或等于总线电压电平时才可能保留总线上的通信，这通常是通过硬件实现的。

图 4-2 是一个连接到空闲 3.3V 总线、无引脚预充电的热插拔隔离式 I²C 器件示例。在连接时，将该部分热插拔器件插入带负载总线可将总线电压降低 60% 以上，即使在“上电热插拔”条件下也是如此。各个系统的总线电压下降的幅度因外部因素（例如总线的 R 和 C 值）而异，可能低于 V_{IL} 或多个 I²C 器件的低电平输入电压阈值，这可能导致连接到总线的其他器件错误地读取到低电平。将该情况与将 ISO1640 插入同一总线时降低约 30% 进行比较，如图 4-2 和图 4-3 所示。

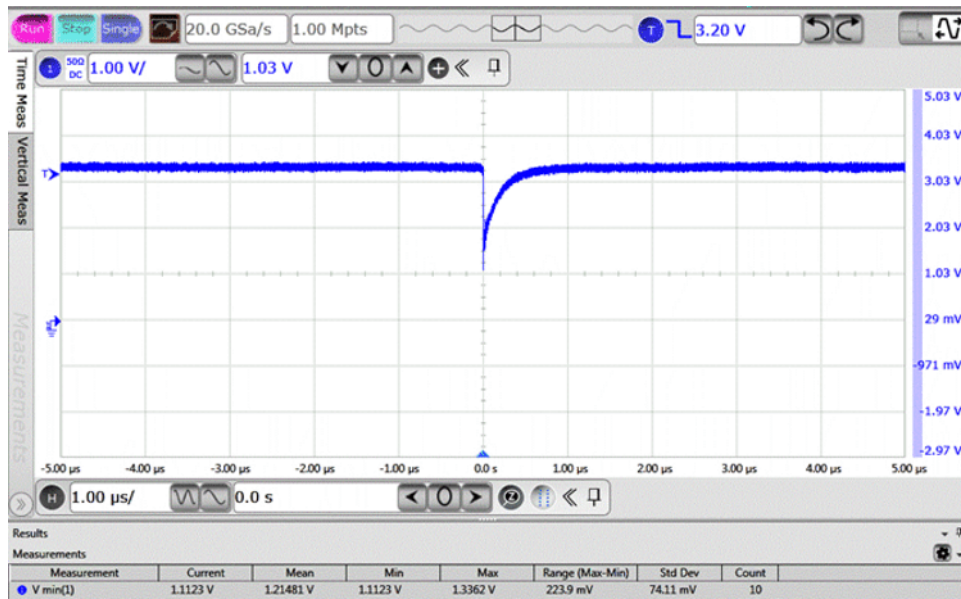


图 4-2. 无引脚预充电的常规 I2C 器件在插入期间对 3.3V 总线施加负载，使其电压降至 1.2V

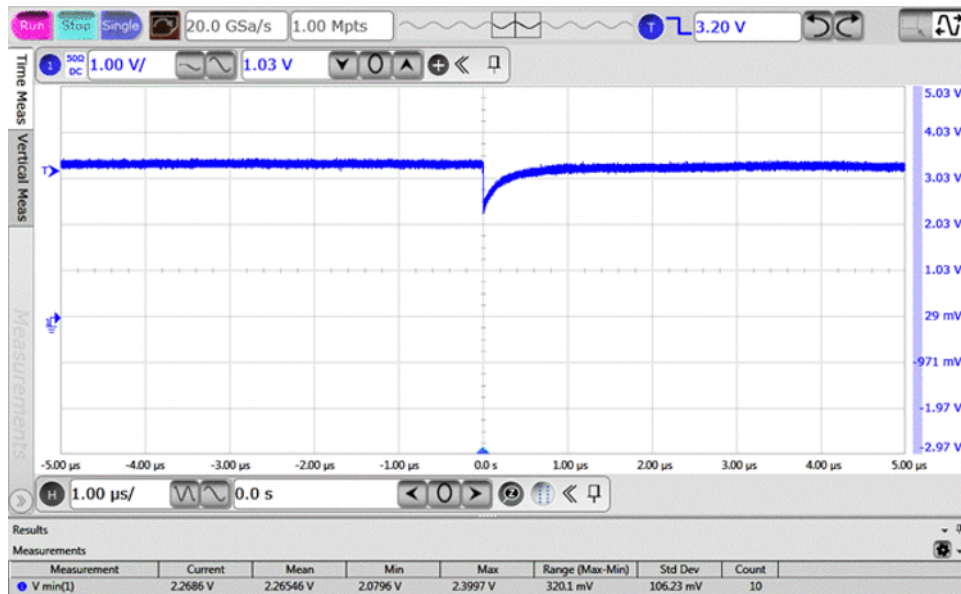


图 4-3. ISO1640 中的引脚预充电在热插拔插入期间对总线施加负载，使其电压降至 2.3V

如节 3 所述，非完全热插拔的器件可能会以多种方式影响 I2C 总线。根据器件的 SDA 和 SCL 总线引脚的内部结构，当器件断电或总线侧电源电压 Vcc2 增减或悬空时，总线可能无法通信。图 4-4 和图 4-6 显示了这些情况的波形；图 4-5 和图 4-7 显示了使用 ISO1640 时相同场景的波形。

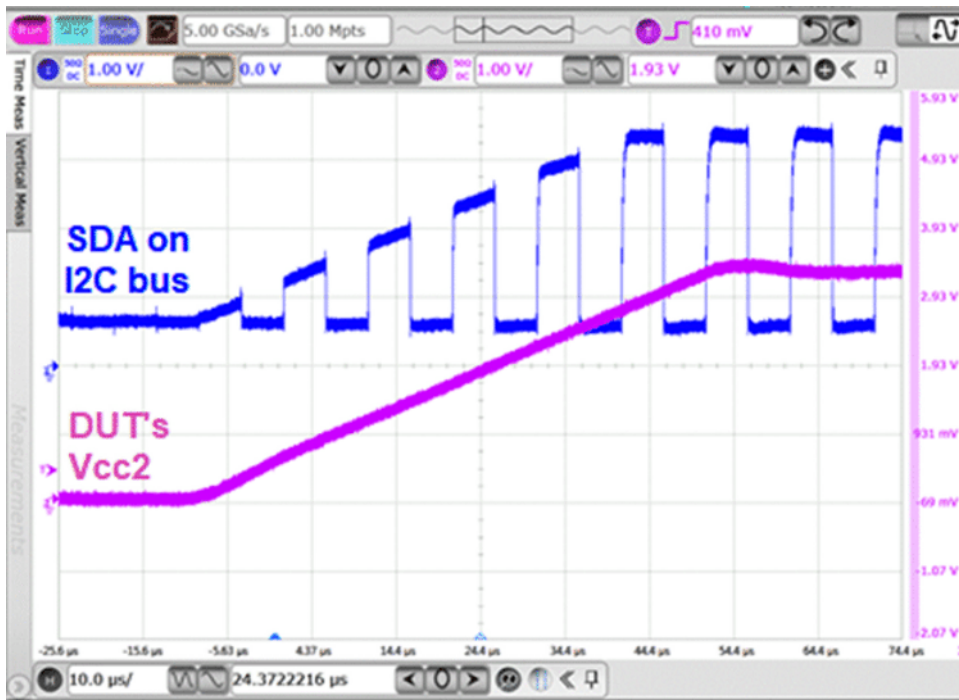


图 4-4. 常规 I²C 器件在插入期间破坏总线通信

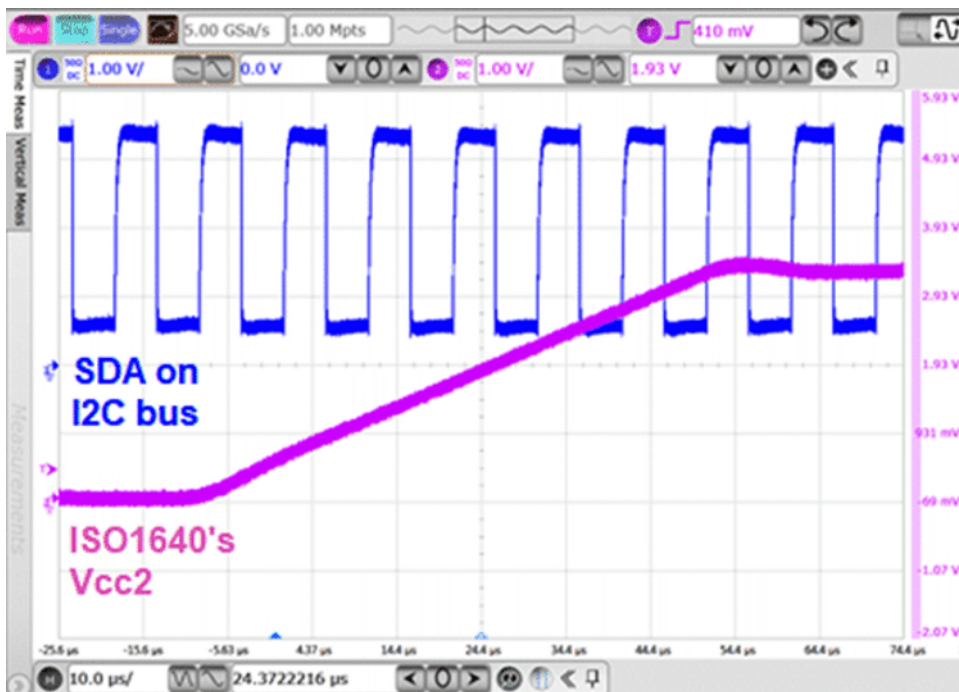


图 4-5. 热插拔 ISO1640 在插入期间保持总线的数据完整性

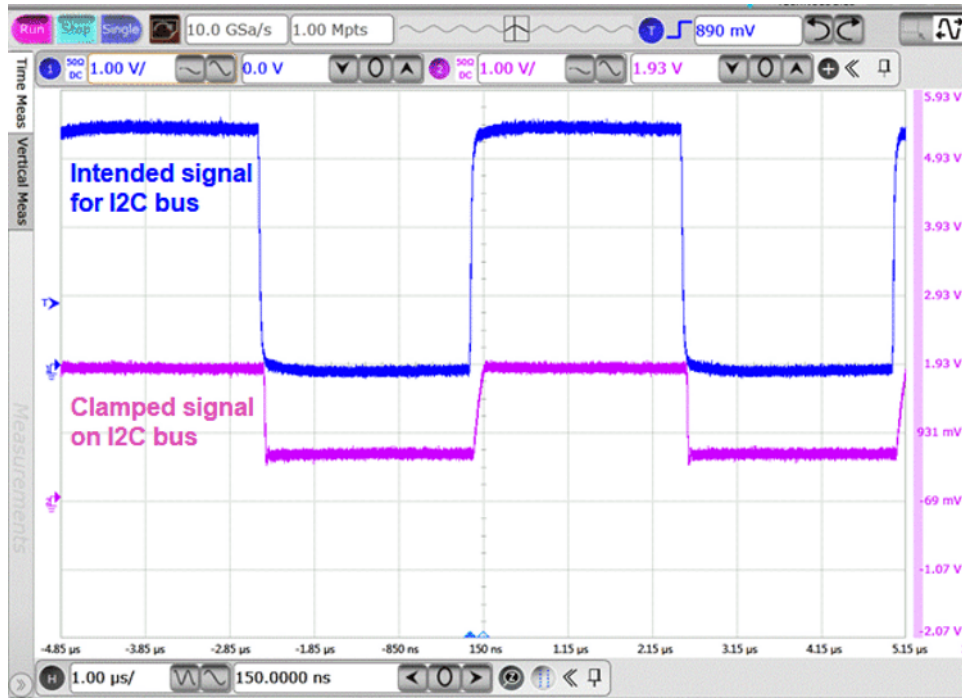


图 4-6. 当一个常规 I²C 器件的总线侧电源悬空时，该器件将 I²C 总线从 3.3V 钳位至大约 2V

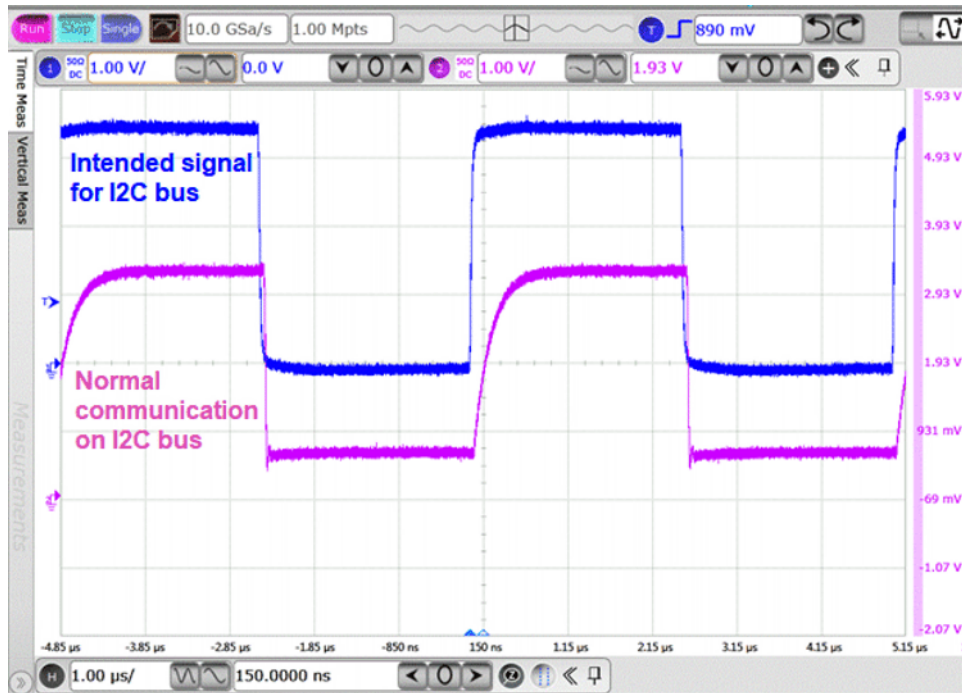


图 4-7. 如果 ISO1640 的 Vcc2 电源悬空，I²C 总线不受影响

除了这些未通电的“上电热插拔”器件首先连接到 I²C 总线的情况外，在常规非热插拔器件中也会发生类似的通信错误，在 I²C 总线上进行每次低电平至高电平转换时，如果信号上升速度足够快，则耦合到 I²C 器件内部电路意外部分的瞬态会导致发生该情况。

5 借助 ISO164x 的内置热插拔功能实现稳健的通信

无论是否使用交错连接器，ISO164x 都会阻止向有源 I2C 总线添加负载。当 V_{cc2} 低于 UVLO 阈值时，ISO164x 总线线路将使用内部电路避免中断或破坏有源 I2C 总线，此外，如果使用交错连接器进行连接，ISO164x 的 SDA 和 SCL 线会预充电，以尽可能地减小为器件的引脚电容充电所需的浪涌电流，从而进一步降低将其添加到总线所产生的影响，如节 4 所示。

在未使用交错连接器或无法集成交错连接器的应用中，仅符合“上电热插拔”标准的器件（需要交错连接器或热插拔控制器）在连接到与节 4 所示系统类似的系统时会产生可能干扰数据通信的影响。TI 的 ISO1640 和 ISO1641 都是“断电热插拔”器件，不需要交错连接器、外部硬件或额外的热插拔电路。一个与电源是否存在无关的专用内部电路可确保 I2C 引脚的开漏输出保持高阻抗模式，并且不会在热插拔或上电瞬态期间将数据线拉至低电平。这可确保即使在使用标准连接器时也能安全地进行热插拔操作。

对于使用通用连接器或 I2C 器件上的 V_{cc2} 电平低于总线上的相应电平的情况，“断电热插拔”器件（包括 TI 的 ISO164x 器件）也会继续帮助保留总线上的信号。这样用户就不必关闭系统电源来连接 I2C 节点或卡，因为这些器件在连接时无论是打开还是关闭都不会破坏总线。

6 采用 ISO164x 的简化系统级 ESD 保护设计

在具有端口或可移除节点的系统中，PCB 通过连接器暴露于外界，从而使其容易因静电放电 (ESD) 而损坏。这些系统级 ESD 事件几乎会发生在与人类或外部物品直接或间接接触的任何产品的外部。因此，通常易受 ESD 事件影响的节点是电源线（交流、直流或电池）和通信线（如 RS-485、CAN 或 I2C）等端子和连线，它们需要承受由 IEC 61000-4-2（称为 IEC ESD）标准定义的 ESD 应力水平。必要的 IEC ESD 保护级别因应用而异。

任何终端应用或设备无论加电还是未加电，都可能会发生 ESD 事件，因此模块和连接点应受到 IEC ESD 保护。行业标准是：无论在何处有暴露的端口，这些端口都需要具有 IEC ESD 保护。例如，I2C 和 RS-485 通信端口通常使用连接器附近的外部保护元件来免受 IEC ESD 的影响，如图 6-1 所示。

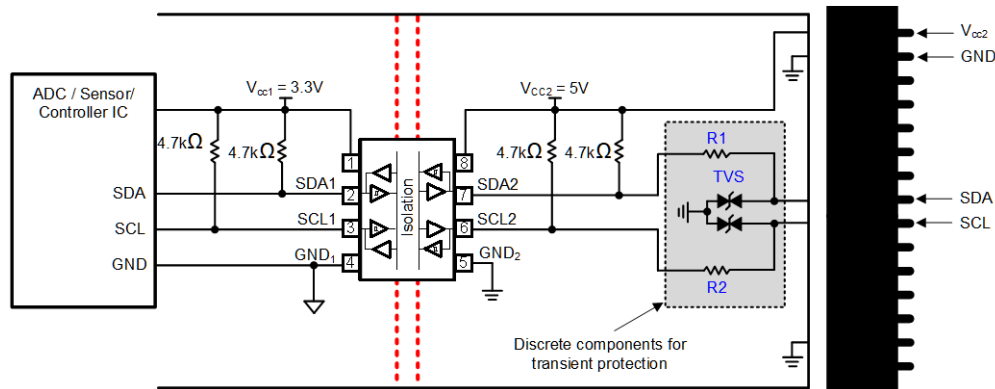


图 6-1. 针对 I2C IEC ESD 的分立式瞬态保护

由于外部 TVS 二极管通常会将电压钳位在器件的最大工作电压 (V_{CC}) 以上，因此先前的解决方案中包含电阻器以进一步降低电压，保护器件免受损坏，而较高的电阻会降低总线的完整性。

ISO164x 的 I2C 总线引脚上设计了增强型 ESD 保护单元，可支持器件 1 侧高达 10kV 的 HBM ESD 和 2 侧高达 14kV 的 HBM ESD。这种集成保护取代了传统上保护 I2C 器件免受 IEC ESD 影响所必需的分立元件，ISO164x 的集成 ESD 保护通过消除对用于 ESD 保护的 TVS 二极管和大电阻器的需求，使系统设计更容易和更可靠，从而使用业界极高的本地 IEC ESD 性能对其 I2C 热插拔功能进行补充。2 侧上的 I2C 总线引脚可以在器件未上电时承受 8kV 的同侧 IEC ESD 冲击，从而提高热插拔应用的稳健性和系统可靠性。

7 结论

TI 的 ISO164x 系列隔离式 I2C 器件具有热插拔电路，有助于在器件插入期间保持 I2C 总线的的数据完整性，而无需交错连接器。此外，ISO164x 的内置系统级 IEC ESD 保护无需外部保护元件，从而简化了可靠的系统级设计。热插拔功能和集成 IEC ESD 相结合，可提高稳健性，同时缩减系统的物料清单 (BOM)。

8 参考文献

- 德州仪器 (TI), [面向热插拔应用的 I2C 解决方案应用报告](#)
- 德州仪器 (TI), [具有增强型 EMC 和的 ISO164x 热插拔双向 I2C 隔离器数据表](#)
- 德州仪器 (TI), [如何隔离 I2C 接口的信号和电源应用简报](#)

9 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (March 2021) to Revision A (March 2022)	Page
• 更新了针对 I2C 的 IEC ESD 的分立式瞬态保护 图像.....	7

重要声明和免责声明

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司