

使用数字隔离器设计隔离式 I²C 总线®接口

作者：Thomas Kugelstadt, 德州仪器 (TI) 高级应用工程师

机械设备设计与使用相关立法的不断变化要求对几乎所有类型工业级系统或接口进行隔离处理。内部集成电路总线 (I²C Bus®) 是一种单端、多主总线、双线总线；同时，尽管它是专为短距离 I²C 通信而设计，但隔离要求都是一样的。

使用标准数字隔离器设计隔离 I²C 接口时，面临的特殊挑战是两者之间不同的工作模式。I²C 总线工作在双向、半双工模式下，而标准数字隔离器则是一些单向器件。若想要有效利用其中一种技术且支持另一种技术，则需要使用外部电路，在没有明显传播延迟的情况下将双向总线分隔成两条单向信号通路。

本文首先简要介绍 I²C 总线工作原理，然后介绍如何通过给数字电容隔离器添加一些外部组件来设计一种隔离式 I²C 接口。

I²C 总线工作原理

I²C 使用开漏技术，因此要求串行数据线 (SDA) 和串行时钟线 (SCL) 通过一些电阻器连接至 V_{DD} (请参见图 1)。线路接地被看作是逻辑“0”，而线路浮接则为逻辑“1”。这种逻辑结构被当作是一种通道访问方法。SCL 为低电平时一定会出现逻辑状态转换，因为 SCL 为高电平时的转换表明“开始”和“停止”状态。尽管允许更高或者更低电压的系统，但典型电源电压一般为 3.3V 和 5V。

I²C 通信使用一个 7 比特地址空间以及 16 个保留地址，因此相同总线的理论最大可通信节点为 112。但实际上，节点数受限於规定总体总线电容 400 pF，其将通信距离限制在数米范围内。规定信号传输速率为 100 kbps (标准模式)、400 kbps (快速模式)、1 Mbps (快速模式+)，以及 3.4 Mbps (高速模式)。

图 1 I²C 总线®

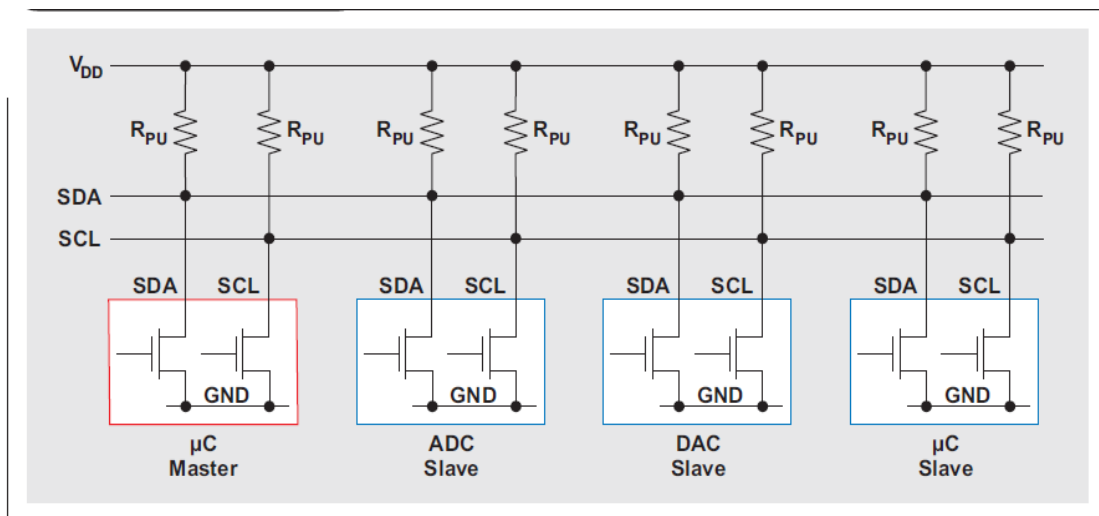
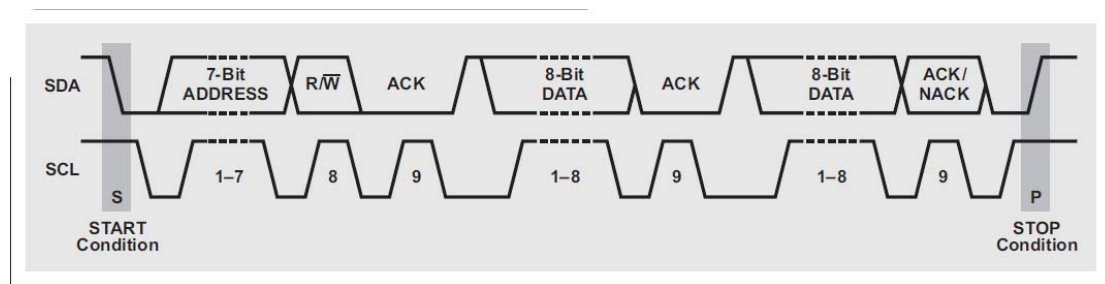


图 2 完整的数据传输时序图



这种总线对各节点而言有两个作用：主总线和从总线。主总线发布时钟，从总线寻址并发起和终止数据事务处理。从总线接收时钟、寻址并响应主总线的请求。图 2 显示了主从总线之间的典型数据传输情况。

主总线通过创建一个“开始”条件发起事务，然后发送其希望与之通信的从总线 7 比特地址。后面紧跟一个单“读/写” (R/W) 比特，其代表主总线是希望对从总线写入“0”，还是从从总线读取“1”。之后，主总线释放 SDA 线，以让从总线确认收到数据。

在 SCL 第九个时钟脉冲的整个高时间期间，从总线通过拉低 SDA 来以一个应答 (ACK) 位作出响应。之后，主总线继续处在发送模式或者接收模式（具体取决于发送的 R/W 位），而从总线则继续处在互补模式（分别接收或者发送）。

地址和 8 比特数据字节首先随最高有效位一起发送。SCL 为高电平时的 SDA 高电平到低电平转换表示“开始”位。SCL 为高电平时的 SDA 低电平到高电平转换构成“停止”条件。

如果主总线对从总线写操作，则其会向从总线重复发送一个字节，其为每个接收到的字节发送一个 ACK 位。这种情况下，主总线处在主发送模式，而从总线则处在从接收模式。

如果主总线对从总线读操作，则其会重复地接收来自从总线的字节，同时发送 ACK 位以确认接收到每一个字节，但最后一个字节除外（请参见图 3）。这种情况下，主总线处在主接收模式，而从总线处在从发送模式。

主总线使用一个“停止”位来停止数据传输，或者发送另一个“开始”位，以保持对后续数据传输的总线控制。

对从总线写操作时，主总线主要工作在发送模式下，仅当接收来自从总线的传输确认时才转入接收模式。

对从总线读操作时，主总线开始于发送模式，在向从总线发送一条“读”请求 (R/W 位=1) 以后便转入接收模式。数据事务处理结束以前，从总线会一直处在互补模式下。

请注意，主总线通过不确认接收到的末字节来结束读取 序列——即发送一个 NACK 位。这一过程会重置从总线状态机，并允许主总线发送“停止”命令。

图 3 数据传输期间发送/接收模式的变化

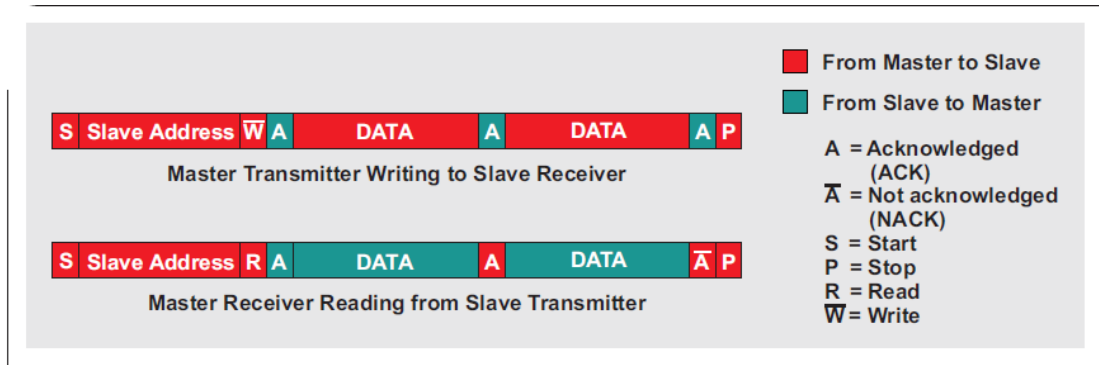
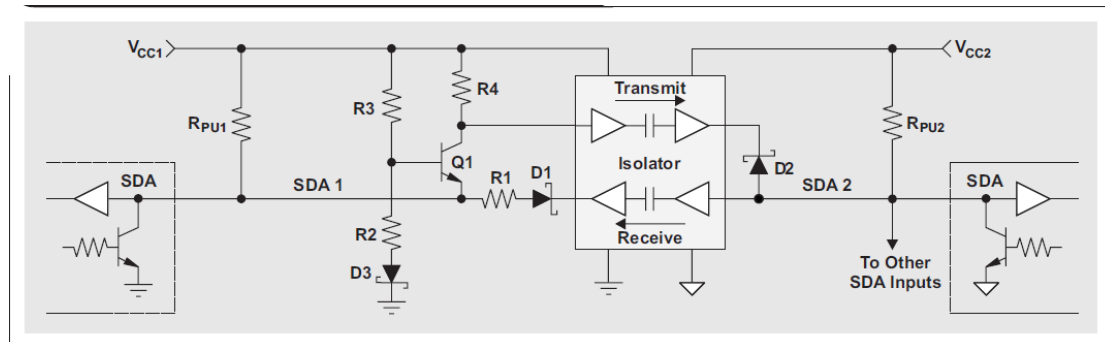


图 4 使用数字隔离器隔离 I²C 线



隔离器设计

使用标准数字隔离器隔离一条 I²C 信号通路要求将半双工线路分成单独的发送和接收通路，并将隔离器的推挽式输出转换成通过肖特基二极管的集电极开路输出（请参见图 4）。为了防止发送的信号反馈其源，我们实施了一种比较器功能，旨在检测信号流方向，并对信号通路进行相应的开关操作。

晶体管 Q1 及其周围的电阻器网络提供了这种比较器功能。由于 I²C 的主导开关电平为逻辑低电平，因此 Q1 的基极如此的偏压，以至于施加于 SDA1 的低电平可以开启晶体管，而 SDA2 发送的低电平将 Q1 保持在高阻抗状态。R3/R2 分压器主要确定偏压，而二极管 D3 提供温度补偿。要防止 SDA2 开启 Q1，需通过 R1 的压降来升高 D1 的低电平输出，从而升高 Q1 的发射极电位 V_E，并将基射极电压降至最小开启电平以下。然而，必须注意要将 V_E 维持在 SDA1 的最小输入高电平阈值以下，其 I²C 规范为 $V_{IHmin} = 0.3 \times V_{CC}$ 。

因此，SDA2 的 I²C 总线被拉低时，接收方向的低状态会导致 SDA1 电压升高，其刚好足以阻滞 Q1，且恰好在 V_{IHmin} 以下，从而防止 I²C 输入出现有效低电平。与此同时，R4 在发送方向为隔离器输入提供逻辑高电平，从而防止二极管 D2 导通。一旦 SDA2 获得释放，且回到 V_{CC2} 电平，SDA1 便跟随一个通过隔离器的传播延迟。隔离器通过总线端 (SDA2) 驱动时，升降沿增加的信号延迟主

要仅由通过隔离器的一个传播延迟组成。

在相反方向，当 SDA1 被拉低时，其最大低电平输出 V_{OLmax} 大大低于 V_E ，且使 Q1 导通。在发送方向通过隔离器的低状态信号正向偏置 D2，而 SDA2 变为低电平。但是，SDA1 获得释放时，其电压不能立即回到 V_{CC1} 电平，这是因为 SDA2 的剩余低电平信号。另外，SDA1 升至阻滞 Q1 的必要 V_E 电位，同时它会保持在这一电平，直到高阻抗 Q1 允许 R4 向隔离器输入提供一个逻辑高电平，从而释放 SDA2 和 D1。只有这样，SDA1 才能回到 V_{CC1} 电平。

隔离器通过器件端 (SDA1) 驱动时，由于比较器功能的加入，升降沿的信号延迟会增加。

图 5 最终隔离器电路

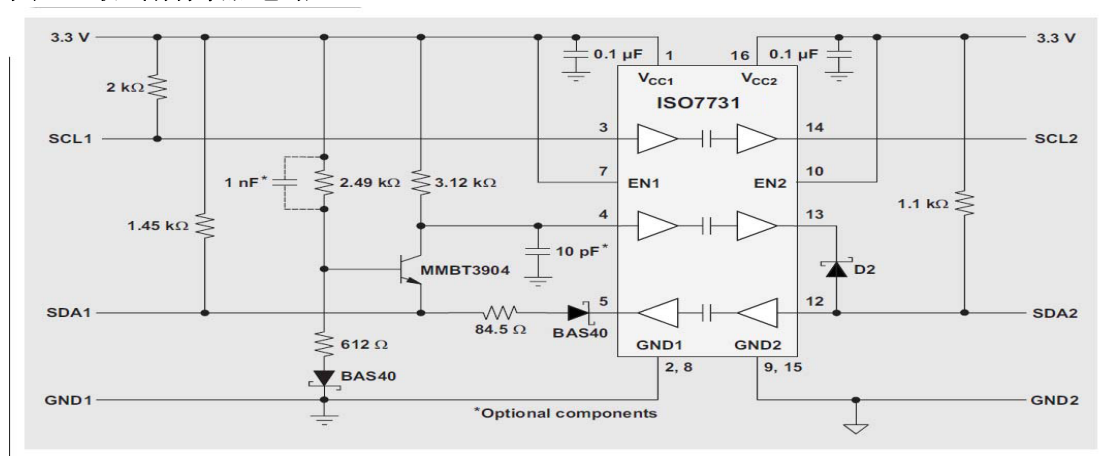


图 5 显示了大多数 I²C 应用的最终隔离器电路，其中主总线与从总线隔离。在这种情况下，仅 SDA 线为双向，而 SCL 为单向。对于两条线路都必须为双向的多主总线系统而言，使用 ISO7742 隔离器时 SDA 电路设计也可适用于 SCL。

表 1 所列典型传播延迟均在 SDA1 和 SDA2 光电容负载条件下测得。请注意，在低电源电压情况下，Q1 集电极的开关瞬态会要求一个 10-pF 滤波电容器来避免内部隔离器逻辑伪触发。另外，通过开关一个与上部基极电阻并联的电容器来增加 Q1 基极电荷注入可以减小传播延迟。

表 1 传播延迟

| SDA1 TO SDA2 | | SDA2 TO SDA1 | | CONDITION |
|------------------|-------------------|------------------|-------------------|--------------|
| RISING EDGE (ns) | FALLING EDGE (ns) | RISING EDGE (ns) | FALLING EDGE (ns) | |
| 121 | 124 | 113 | 82 | No caps |
| 136 | 140 | 113 | 82 | 10 pF |
| 103 | 136 | 113 | 82 | 10 pF + 1 nF |
| 86 | 140 | 113 | 82 | 1 nF |

相关网址:

<http://www.ti.com.cn/zh-cn/interface/overview.html>

www.ti.com.cn/product/cn/ISO7731

www.ti.com.cn/product/cn/ISO7742

重要声明

德州仪器 (TI) 及其下属子公司有权在不事先通知的情况下, 随时对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权随时中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的 TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的硬件产品的性能符合 TI 标准保修的适用规范。仅在 TI 保修的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非政府做出了硬性规定, 否则没有必要对每种产品的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 产品或服务的组合设备、机器、流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或隐含权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的数据手册或数据表, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。在复制信息的过程中对内容的篡改属于非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任。

在转售 TI 产品或服务时, 如果存在对产品或服务参数的虚假陈述, 则会失去相关 TI 产品或服务的明示或暗示授权, 且这是非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类虚假陈述不承担任何责任。

可访问以下 URL 地址以获取有关其它 TI 产品和应用解决方案的信息:

产品

| | |
|-------|---|
| 放大器 | http://www.ti.com.cn/amplifiers |
| 数据转换器 | http://www.ti.com.cn/dataconverters |
| DSP | http://www.ti.com.cn/dsp |
| 接口 | http://www.ti.com.cn/interface |
| 逻辑 | http://www.ti.com.cn/logic |
| 电源管理 | http://www.ti.com.cn/power |
| 微控制器 | http://www.ti.com.cn/microcontrollers |

应用

| | |
|-------|---|
| 音频 | http://www.ti.com.cn/audio |
| 汽车 | http://www.ti.com.cn/automotive |
| 宽带 | http://www.ti.com.cn/broadband |
| 数字控制 | http://www.ti.com.cn/control |
| 光纤网络 | http://www.ti.com.cn/opticalnetwork |
| 安全 | http://www.ti.com.cn/security |
| 电话 | http://www.ti.com.cn/telecom |
| 视频与成像 | http://www.ti.com.cn/video |
| 无线 | http://www.ti.com.cn/wireless |

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2006, Texas Instruments Incorporated

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2018 德州仪器半导体技术（上海）有限公司