

Application Note

汽车系统中的接地电平电压转换



Sakshi Markhedkar

摘要

现代汽车系统越来越依赖于跨多个接地域运行的分布式电子元件。由大电流负载、长电缆运行、开关噪声或有意的接地偏移扫描引起的接地电位差会干扰低压数字通信并影响系统可靠性。

本应用手册介绍德州仪器 (TI) [接地电平电压转换 \(TXG\) 系列](#)，并说明 TXG 系列如何解决静态和动态接地偏移问题，从而在汽车系统中无需电隔离即可实现接地不匹配的可靠通信。

内容

1 引言：汽车接地实际情况.....	2
2 汽车接地电平电压转换 (TXG) 产品系列.....	3
3 使用 TXG 接地电平转换器的汽车应用示例.....	4
3.1 桥接 48V/12V 汽车系统中的逻辑域和电源域.....	4
3.2 简化汽车媒体集线器和 USB 充电.....	5
3.3 48V 汽车系统中稳健的电池监控.....	6
3.4 简化多板 I/O 设计.....	8
3.5 汽车音频系统.....	9
3.6 电动助力转向子系统冗余安全.....	10
3.7 跨接地域的稳健 IGBT 温度遥测.....	10
3.8 缓解单端接口中的接地反弹.....	10
3.9 ADAS 摄像头中的可靠通信.....	11
4 何时使用 TXG 与电隔离.....	12
5 入门.....	12
6 总结.....	12
7 参考资料.....	13

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言：汽车接地实际情况

在理想系统中，所有接地基准均相等。但在实际汽车设计中，这一假设往往不成立。原因是共用公共车身接地，或在现代 ECU 设计中跨多个接地域运行，从而导致杂散寄生效应引起的直流接地偏移和混合信号电路带来的交流接地噪声。接地不匹配的常见原因包括：

- 导致直流接地偏移的大电流负载，尤其是在牵引逆变器和电动助力转向装置中
- 长线束和远程模块
- 导致交流接地反弹的高频数字开关噪声
- 电源接地与信号接地之间的共用回流路径
- 冗余或区域架构中的有意接地偏移
- 集成 48V/24V/12V 子系统等多元电源域

设计人员通常尝试使用接地平面分区、星形接地、分立式电平位移电路或电隔离来管理接地不匹配。虽然这些方法在某些情况下很有效，但会增加成本、PCB 面积、延迟和设计复杂性，尤其是在不需要安全隔离的情况下。

接地电平电压转换 (TXG) 系列通过在内部隔离两个接地域可实现接地电平电压转换，同时保持信号完整性。TXG 器件提供了一种简单的解决方案，能够容忍直流接地偏移和交流接地噪声，而不会破坏接地连续性或增加隔离成本，同时实现用于实时通信的快速数据处理，并更大限度地降低功耗以延长电池寿命。

2 汽车接地电平电压转换 (TXG) 产品系列

汽车接地电平电压转换 (TXG) 产品系列包括符合 AEC-Q100 标准的 1 位、2 位和 4 位接地电平转换器，可对电压和接地进行电平位移，从而实现跨不同电源域的通信。这些器件支持高达 $\pm 80V$ 的接地偏移容差和高达 130VPP (1MHz) 的交流噪声抑制，同时支持常见的汽车信号接口。TXG 产品系列以紧凑的外形提供可扩展性，具有多种通道数量选项和方向配置，如表 2-1 所示。

主要特性包括：

- 带独立 GND 的固定方向推挽电平位移：[TXG80xx-Q1](#)、[TXG40xx-Q1](#)、[TXG10xx-Q1](#)
- 带独立 GND 的自动双向漏极开路电平位移：[TXG8122-Q1](#)
- 超低延迟，支持快速通信 (传播延迟 < 8ns)
- 低通道间偏斜 (< 2ns)
- 共模瞬态抗扰度 (CMTI) 高达 1kV/us
- 施密特触发输入，可消除噪声信号
- Ioff 支持局部关断模式运行
- 引线式和无引线式封装选项

表 2-1. 汽车接地电平转换器产品系列

I/O 类型	通道数量	通道方向	接口	接地直流失调电压			封装尺寸		
				$\pm 80V$	$\pm 40V$	$\pm 10V$			
推挽 (1.71V-5.5V ， 5mA 驱动， 250Mbps)	4 通道	3 个正向 1 个反向	SPI、PCM TDM/I ² S	TXG8041-Q1	TXG4041-Q1	TXG1041-Q1	RUC X2SON-14 4mm ²	DYY SOT-14 13.7mm ²	DBQ QSOP-16 29.4mm ²
		2 个正向 2 个反向	UART	TXG8042-Q1	TXG4042-Q1	TXG1042-Q1			
	2 通道	1 个正向 1 个反向	UART	TXG8021-Q1	TXG4021-Q1	TXG1021-Q1	DSG WSON-8 4mm ²	DDF SOT-23-8 8.1mm ²	D SOIC-8 29.4mm ²
		2 个正向 0 个反向	GPIO	TXG8020-Q1	TXG4020-Q1	TXG1020-Q1			
	1 通道	1 个正向	GPIO	TXG8010-Q1	TXG4010-Q1	TXG1010-Q1	DSE WSON-6 2.25mm ²		
漏极开路 (1 侧： 3V-5.5V， 3.5mA 灌电 流， 2 侧： 2.25V-5.5V， 50mA 灌电 流， 1MHz)	2 通道	自动双向	I ² C、 SMBus	TXG8122-Q1	TXG4122-Q1	TXG1122-Q1	DSG WSON-8 4mm ²	DDF SOT-23-8 8.1mm ²	D SOIC-8 29.4mm ²

3 使用 TXG 接地电平转换器的汽车应用示例

3.1 桥接 48V/12V 汽车系统中的逻辑域和电源域

在现代 48V/12V 汽车系统的区域控制模块和 12V/48V 配电箱中，常见应用采用基于 GaN 的功率级设计、大功率降压/升压和半桥来实现区域电源架构。在该架构中，功率级和栅极驱动器通常在局部基准域中运行，该域可相对于系统/MCU 接地端移动。这带来了一个实际挑战：因为来自栅极驱动器（PWM/使能引脚）的系统微控制器（MCU）的控制信号以逻辑接地为基准，但 GaN 栅极驱动器输入引脚（自举/偏置）可能以另一个悬空接地为基准。此外，半桥开关节点处的快速开关边沿和高 dV/dt 也可能注入接地噪声。

如图 3-1 所示，TXG8020-Q1 或 TXG8010-Q1 可帮助将栅极驱动器域的嘈杂电源接地与 MCU 域的静默逻辑接地进行分区隔离。MCU 将数字 I/O (PWM/EN) 驱动至 TXG 的 A 侧输入端，相应的 B 侧输出会通过清晰的逻辑转换再现以 GaN 驱动器域为基准的信号。重要设计说明：

- 域定义至关重要：必须尽早规划 GNDA（静默逻辑）和 GNDB（驱动器局部/开关），以使 PWM 基准在其终止位置正确无误。
- 两根电源轨上的局部去耦：在靠近 TXG 器件的位置对 VCCA 和 VCCB 进行去耦。
- 信号完整性：保持较短的 PWM 布线，控制回流路径，避免通过嘈杂的开关节点区域布线 B 侧信号。
- 可扩展性：TXG 提供 4 通道、2 通道和 1 通道选项，可对多个相关控制信号（例如 PWM、使能、复位、中断）以及常用的数字接口进行电平位移，从而减少胶合逻辑。

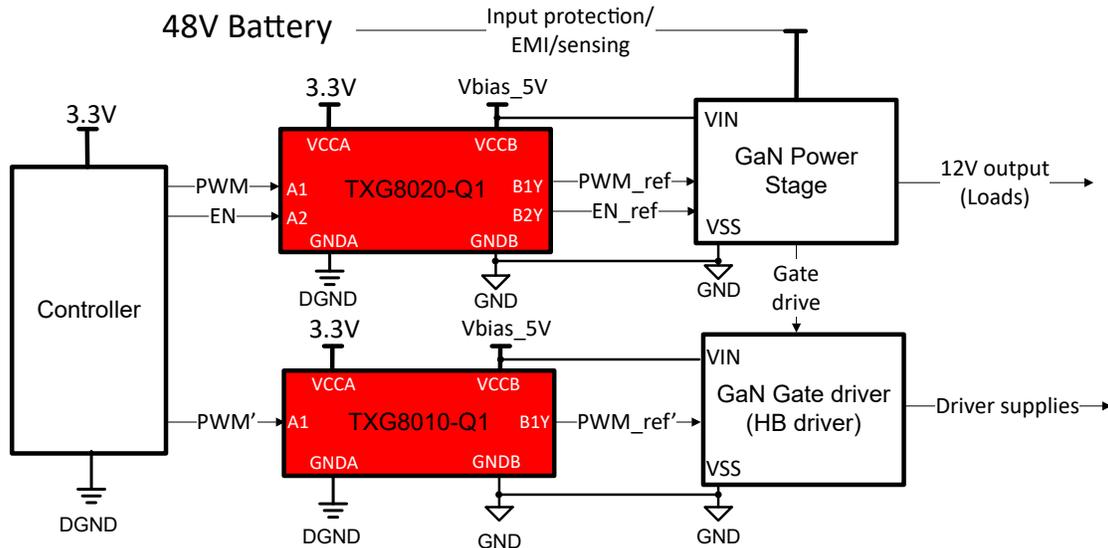


图 3-1. 使用 TXG8020-Q1 的 48V/12V 直流/直流转换器中的分区接地方框图

3.2 简化汽车媒体集线器和 USB 充电

在多端口 USB 集线器设计的现代汽车辅助系统中，每个 USB PD 控制器均通过其局部 Vbus 基准接地运行，而中央 MCU 位于单独的 3.3V 逻辑域中。由于这些域之间可能存在接地偏移，因此直接连接 I²C 线路可能会降低噪声容限并影响通信可靠性。

TXG8122-Q1 用作每个 PD 控制器与 MCU 之间的双向 I²C 接地电平转换器，如图 3-2 所示。通过将一侧连接到 PD 控制器的局部电源/接地端，另一侧连接到 MCU 的 3.3V 域，该器件将 SDA 和 SCL 重新设置为以相应接地端作为基准，同时保持兼容的逻辑阈值。这可以实现稳健的多域 I²C 通信而无需电隔离，从而简化整体电源和接口架构。

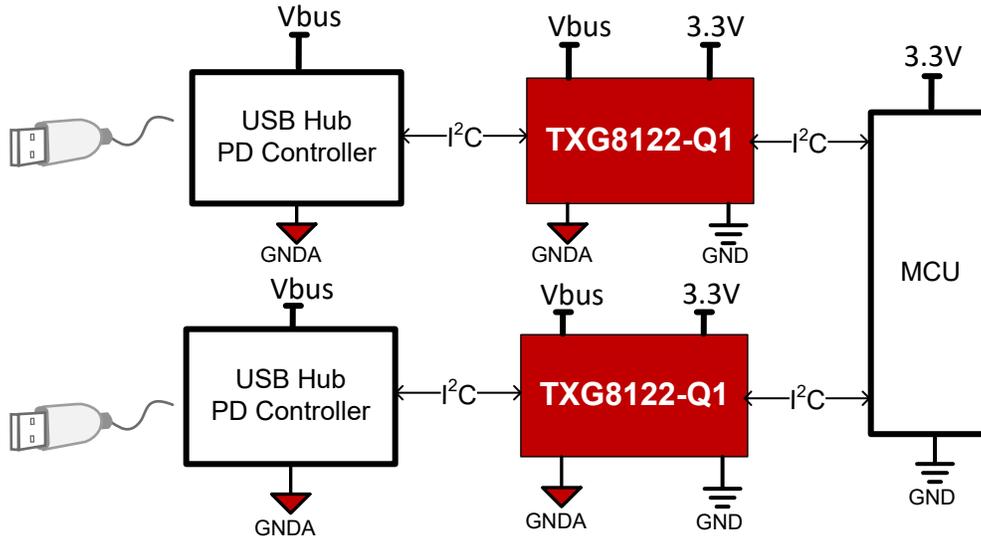


图 3-2. 使用 TXG8122-Q1 的汽车媒体集线器和 USB 充电方框图

3.3 48V 汽车系统中稳健的电池监控

在 HEV/EV 电池管理系统 (BMS) 和高精度电池管理单元 (BMU) 应用等 48V 汽车检测模块中，系统控制器与电池组监控器件之间的通信通常会跨越具有不同逻辑电压和接地基准的域。电池堆叠技术能够为 EV 提供更高的电压、更长的运行时间和提升的能源容量。电池监控 IC 可测量许多串联电芯上的电压、温度和电芯平衡状态，这些电芯可能会出现较小的接地偏移和噪声。系统微控制器在稳压低压逻辑域 (例如 3.3V) 中运行，而由于系统分区、基于分流的电流测量和局部接地策略，电池监控 IC 和关联检测电路可能位于不同的 I/O 电压域中。在该架构中，每个电池监控器测量电池组的一部分。顶部监控器的接地基准电压通常接近整个电池组电压的一半 (如 48V 或 24V)，因此与 MCU 的接地基准电压不同，导致无法直接通信并带来了接地偏移。控制器与监控器域之间的可靠通信 (通过 I²C 或 UART 接口) 对于电池组的精准测量、状态评估和安全运行至关重要。当系统架构不需要在这些域之间进行完全电隔离 (即接地电位差保持在可接受的限制范围内，并可在其他位置处理安全隔离栅) 时，可以使用更简单的非隔离式解决方案。

如图 3-3 所示，TXG8041-Q1 作为系统 MCU 与电池监控器件之间的多通道逻辑电平转换器实现。TXG8041-Q1 通过转换 MCU 电源域与监控器域之间的数字接口信号 (包括时钟、GPIO、UART/SPI 和其他控制线路) 来桥接这些域。这种电平位移可验证符合 VIH/VIL 阈值，防止 I/O 过应力，并在存在汽车噪声和接地电位变化的情况下保持信号完整性。通过将转换器置于控制和测量子系统之间的边界，该设计可实现稳健的跨域通信，同时在 48V 架构内保持正确的接地分区。

图 3-3 显示类似的实现，使用 TXG8122-Q1 实现不匹配逻辑电源轨之间的 I²C 接口，同时还将信号重新设置为以每侧的局部接地为基准。

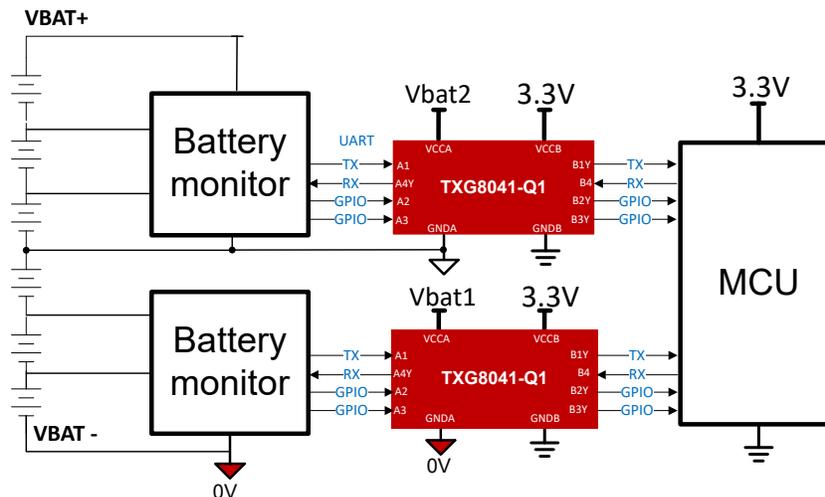


图 3-3. 使用 TXG8041-Q1 的 48V 汽车系统电池监控方框图

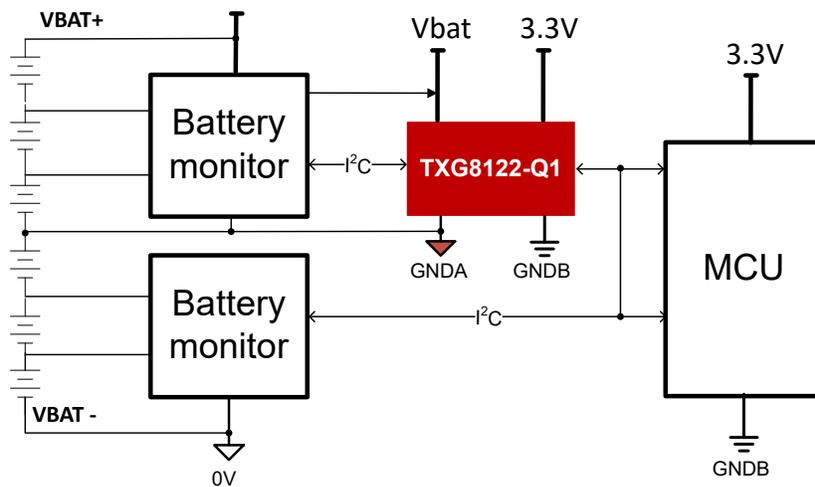


图 3-4. 使用 TXG8122-Q1 的电池管理单元系统方框图

3.4 简化多板 I/O 设计

在汽车显示以及 ADAS 和信息娱乐融合控制器等现代车载信息娱乐架构中，TXG1042-Q1 在板间接口处执行电压电平转换，使每个 PCB 都能通过原生局部 I/O 电源轨（例如主机/SoC 板上的 3.3V 和外设板上的 1.8V）运行，如图 3-5 所示。这样就无需跟踪电源来强制在两个 PCB 之间匹配 I/O 电压。由于电源树耦合减少，电源轨管理得以简化，同时保持了在连接器上可靠的 I/O 兼容性。

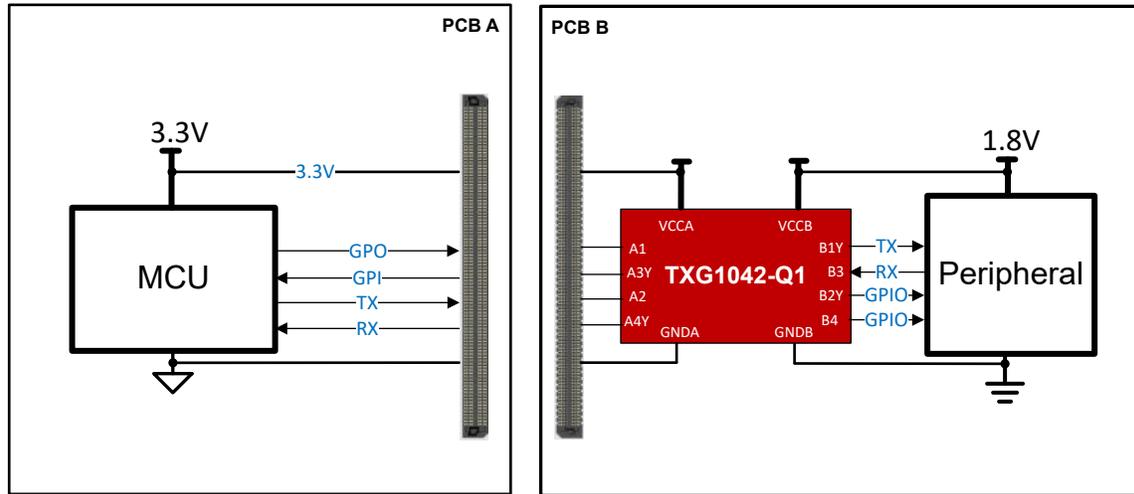


图 3-5. 使用 TXG1042-Q1 简化多板 I/O 设计方框图

3.5 汽车音频系统

在带有精密模拟元件的汽车音频放大器和混合信号系统中，D 类放大器和高速数据转换器通常会带来开关噪声、接地反弹和交流接地干扰，从而导致接地噪声或不稳定，可能损坏低压数字接口并导致系统之间的信号完整性问题。传导至音频转换器 (ADC/DAC) 接地的噪声会引起参考电压波动，进而导致性能下降或录音和播放失真。

D 类音频放大器中的负电源轨可能还需要特意进行接地偏移，以增加放大器输出的总电压摆幅，从而为扬声器提供更高的功率，实现更响亮、更清晰的音频播放。TXG 接地电平转换器通过保持一致的逻辑阈值并将敏感控制信号与嘈杂的接地域隔离，来提供稳健的信号完整性。如图 3-6 所示，TXG8122-Q1 用于将 I²C 总线上的 MCU 控制信号与音频电路隔离，而 TXG4041-Q1 用于隔离返回到控制器的音频数据总线。TXG 器件还用于弥合位于 0V 接地端的应用 SoC 与 ±2.5V 处 D 类功率级之间的偏移。

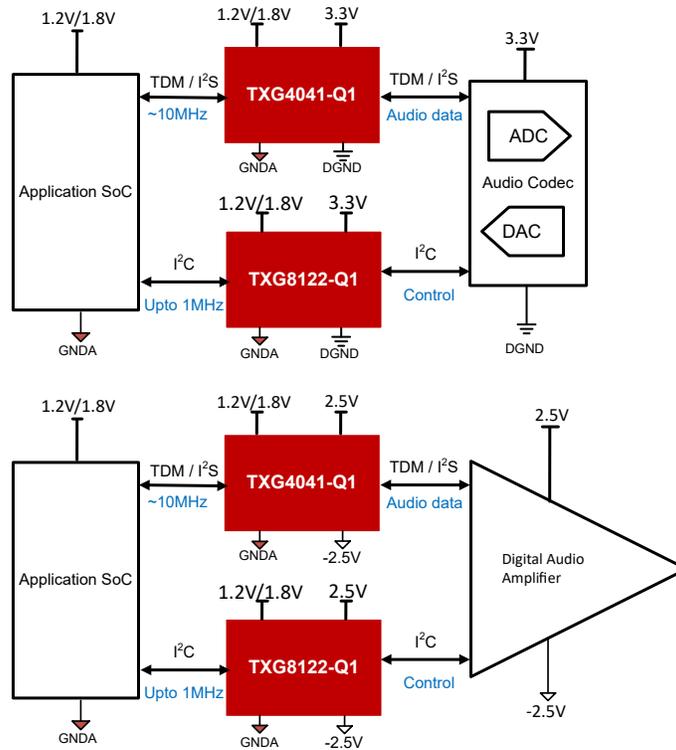


图 3-6. 使用 TXG8122-Q1 和 TXG4041-Q1 的汽车音频系统方框图

3.6 电动助力转向子系统冗余安全

在电动助力转向子系统中，使用两个微控制器可在故障事件期间维持持续运行。两个 MCU 相互通信，但其中一个用作冗余备份，以防主 MCU 停止工作。虽然两个 MCU 通常都以公共接地为基准，但系统中的高电流负载会导致两个域之间发生接地漂移。传统上，使用数字隔离器来管理这些接地电势差。但是，这种情况不需要电隔离，TXG4041-Q1 是一种更紧凑且更具成本效益的替代方案，如图 3-7 所示。

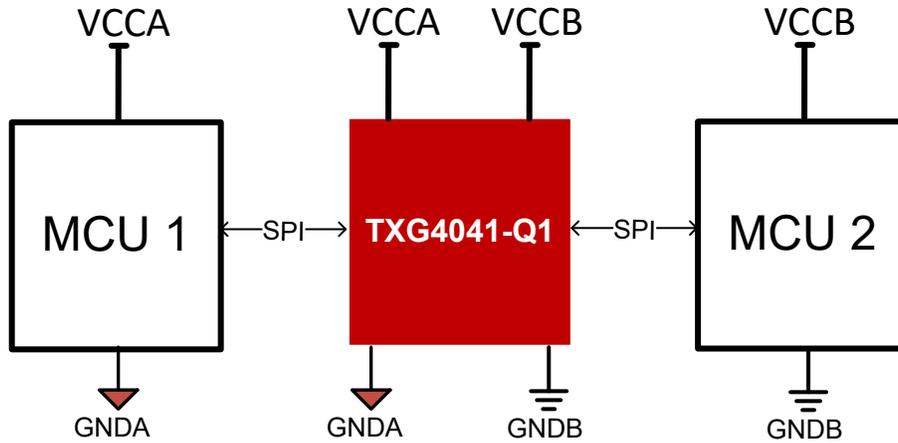


图 3-7. 使用 TXG4041-Q1 的电动助力转向系统方框图

3.7 跨接地域的稳健 IGBT 温度遥测

在牵引逆变器中，通常使用嵌入在电源开关或底板附近的 NTC 电阻器来监控 IGBT 模块温度。NTC 形成与温度相关的电压（通常通过偏置和上拉网络），该电压通过位于逆变器电源域中、靠近检测点的 ADC 进行数字化。将 ADC 置于 IGBT/NTC 附近可以更大限度地缩短模拟布线长度，提高对高 dV/dt 开关噪声的抗扰度，并有助于在电气条件恶劣的逆变器环境中保持测量精度。ADC 通过 I²C 将转换结果传输至主逆变器控制器，但 ADC 侧以局部接地端为基准，后者可能因开关电流和接地反弹而相对于 MCU 逻辑接地发生偏移。

如图 3-8 所示，将 TXG8122-Q1 插入 I²C 路径，以提供双向 SDA/SCL 电平转换和接地域重新设置基准。当 VCCA/GNDA 连接到 MCU 域且 VCCB/GNDB 连接到 ADC 域时，TXG8122-Q1 保持符合逻辑阈值并提高接口噪声容限，从而无需电隔离即可通过 IGBT NTC 检测网络实现可靠的温度遥测。

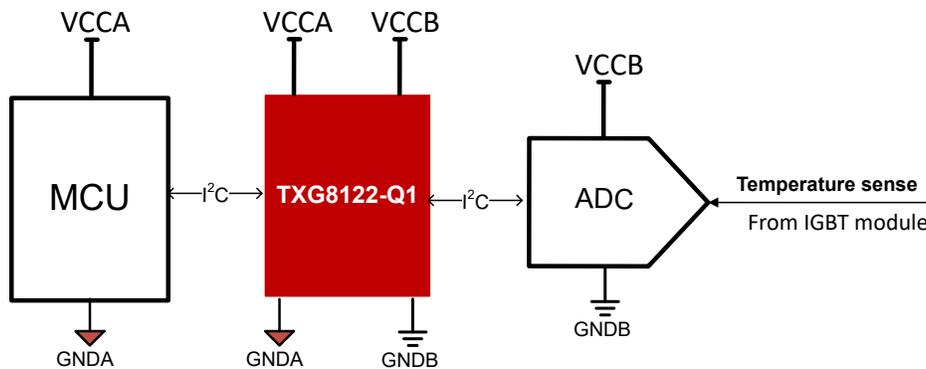


图 3-8. 使用 TXG8122-Q1 的 IGBT 温度遥测方框图

3.8 缓解单端接口中的接地反弹

在主机单元和数字座舱处理等使用单端 FSI 的 IVI 架构中，接口更容易受到接地反弹和板间接地电位差的影响。随着数据速率的提升，即使源板和接收板之间的接地电位差很小，也可能会降低有效噪声容限，使逻辑阈值失真并增加接收器的时序/抖动敏感度。为提高稳健性，可将 TXG1010-Q1 置于板间边界处（如图 3-9 所示），作为微型 2.25mm² 接地电平转换器，该转换器将单端 FSI 信号重新设置为以接收侧的局部接地域为基准，同时还验证兼

容的 I/O 逻辑电平。当 VCCA/GNDA 连接到源端 I/O 电源轨且 VCCB/GNDB 连接到接收端 I/O 电源轨时，该转换器可帮助将高速接口与互连的接地偏移去耦，从而提高接地反弹容差并在 FSI 接收器上保持清晰的逻辑转换。

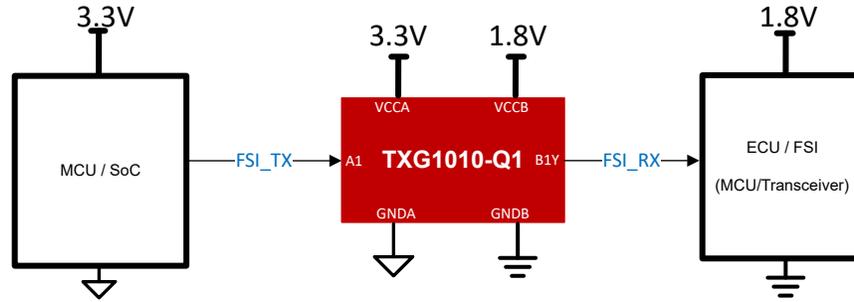


图 3-9. 使用 TXG1010-Q1 的稳健单端接口方框图

3.9 ADAS 摄像头中的可靠通信

在 ADAS 汽车摄像头中，主处理器或安全 MCU 通常通过 5V 逻辑域运行，而串行器/解串器 (SerDes) 器件通常使用 3.3V I/O 电源轨。在分布式摄像头架构中，MCU 和 SerDes 也可以驻留在不同的接地区域，因为 SerDes 通常更靠近图像传感器和高速链路电路。线缆返回电流、EMI 和高速开关活动引起的接地偏移可能会降低用于配置、诊断和状态监控的 I²C 等低速控制接口的噪声容限。

在 MCU 和 SerDes 之间插入 TXG8122-Q1 可提供双向 I²C 电压转换和接地域重新设置基准，如图 3-10 所示。通过将 VCCA 连接到 5V MCU 域和将 VCCB 连接到 3.3V SerDes 域，该器件可保持符合规范的 SDA 和 SCL 逻辑阈值，同时能够承受 GNDA 和 GNDB 之间的中等接地偏移。这种方法无需电隔离即可实现稳健的跨域通信，在提升系统可靠性的同时简化了 ADAS 摄像头模块的多电压电源架构。

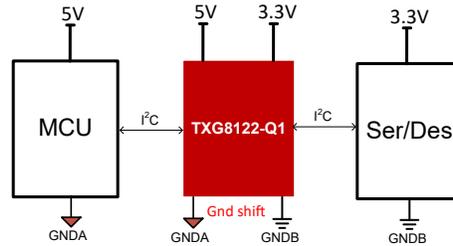


图 3-10. 使用 TXG8122-Q1 的 ADAS 摄像头系统方框图

4 何时使用 TXG 与电隔离

当存在接地不匹配但不需要电隔离时，建议使用 TXG 器件。这些器件为 I²C、SPI、UART 和 GPIO 等汽车接口提供低延迟、高速信号传输和具成本效益的稳健性。

- 当无需电隔离但需关注接地不匹配问题时，适合使用 TXG 系列。
- TXG 系列器件适用于低电压场景（最高 80V），可提供静态或动态抗扰度 (CMTI 1kV/μs)。
- 使用 ISO 断开电流循环并确保安全应用。

表 4-1. 接地电平转换器与电隔离器

参数	接地电平转换器	电隔离器
接地 A 与接地 B 存在差异	最高 +80/-80V	> 1kV
传播延迟	< 5ns	> 11ns
通道间偏斜	0.35ns	4.7ns
电平位移功能	1.71 — 5.5V	1.71 至 1.89V 和 2.25V 至 5.5V
尺寸	单通道最小 2.25mm ² ， 双通道最小 4mm ²	双通道最小 6mm ²
共模瞬态抗扰度 (CMTI)	1kV/μs	100kV/μs
数据速率	> 250Mbps	高达 150Mbps
电隔离栅	否	是
认证 (UL、VDE、浪涌)	否	是
接地间漏电	<100nA	<1nA
EMC (EFT、RI、IEC-ESD)	否	是
每通道成本	低	高
用例适配	低于 80V 的接地偏移	高压系统和安全认证

5 入门

设计人员可使用提供的 TI 应用手册、技术文章、[评估模块](#)和参考设计开始评估 [TXG 产品系列](#)。[TI E2E™ 支持论坛](#)可提供额外的技术帮助。

6 总结

现代汽车架构将电子元件分布在多个电压、电源和接地域上，使接地不匹配成为反复出现的系统级挑战。大电流负载、长线束、开关噪声、有意偏移和区域划分可能会引入直接地偏移和交流干扰，从而降低数字接口的可靠性。在无需安全隔离的情况下，传统的缓解方法（包括接地策略、分立式电平位移和电隔离）通常会增加成本、延迟、功耗和设计复杂性。德州仪器 (TI) [接地电平电压转换 \(TXG\) 系列](#)提供了一种紧凑、可扩展的设计，能够在同步电压和接地转换的同时保持信号完整性。

TXG 器件支持高达 ±80V 的接地偏移、低传播延迟、强大的抗噪性能和灵活的通道选项，可为 I²C、SPI、UART、GPIO 和音频等接口实现可靠的跨域通信，适用于电源系统、电池监控、信息娱乐、音频、ADAS 和安全子系统等各种应用。TXG 产品系列将低延迟性能、小尺寸集成与具成本效益的稳健性相结合，使设计人员能够有效地管理接地域交互，同时提升下一代汽车系统的可扩展性、可靠性和架构灵活性。

7 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [接地电平转换器产品系列](#) 产品系列。
2. 德州仪器 (TI), [TXG804x-Q1 4 位 ±80V 接地电平转换器](#) 数据表。
3. 德州仪器 (TI), [TXG802x-Q1 2 位 ±80V 接地电平转换器](#) 数据表。
4. 德州仪器 (TI), [TXG8010-Q1 1 位 ±80V 接地电平转换器](#) 数据表。
5. 德州仪器 (TI), [TXG8122-Q1 ±80V 适用于 I2C 的双向接地电平转换器](#) 数据表。
6. 德州仪器 (TI), [TXG404x-Q1 4 位 ±40V 接地电平转换器](#) 数据表。
7. 德州仪器 (TI), [TXG402x-Q1 2 位 ±40V 接地电平转换器](#) 数据表。
8. 德州仪器 (TI), [TXG104x-Q1 4 位 ±10V 接地电平转换器](#) 数据表。
9. 德州仪器 (TI), [TXG102x-Q1 2 位 ±10V 接地电平转换器](#) 数据表。
10. 德州仪器 (TI), [接地不均匀? 使用全新的接地电平转换器解决偏移挑战](#) 技术文章。
11. 德州仪器 (TI), [并非所有接地均为 0V](#) 应用简报。
12. 德州仪器 (TI), [TI 最新接地电平转换器](#) 产品概述。

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 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月