

适用于工业驱动器且经过 TUEV 评估的安全转矩关闭 (STO) 参考设计 (IEC 61800-5-2)



说明

此参考设计概述了具有 CMOS 输入隔离式 IGBT 栅极驱动器的三相逆变器中使用的安全转矩关闭 (STO) 子系统。该 STO 子系统采用双通道架构 (1oo2)，硬件容错能力为 1 (HFT=1)。它是按照失电跳闸概念实现的。当双路 STO 输入 (STO_1 和 STO_2) 变为低电平有效时，将通过负载开关切断六个隔离式 IGBT 栅极驱动器初级侧和次级侧的相应电源，从而停止控制电机并为其供电。此 STO 参考设计 (1oo2) 经过 TUEV SUED 评估，通常符合 SIL 3 和 PL e/Cat 3 标准。

资源

TIDA-01599 、 TIDA-00199	设计文件夹
ISO1211 、 ISO5852S	产品文件夹
TPS27S100 、 TPS22919	产品文件夹
ISO5452 、 ISO7710	产品文件夹
UCC21750 、 UCC5350	产品文件夹
TIOS1013	产品文件夹

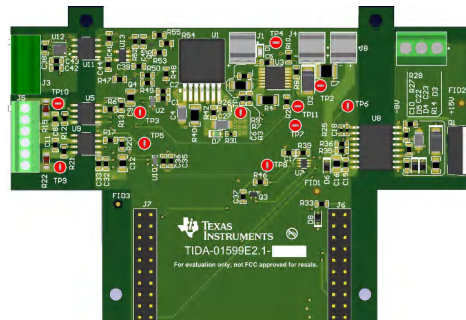
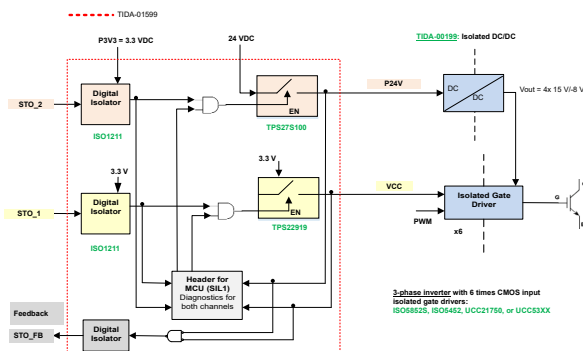


特性

- 经过 TUEV SUED 评估、符合 SIL 3 (IEC 61508) 和 PL e | Cat. 3 (ISO 13849) 标准的双通道 STO 架构 (1oo2)
- 可提供 TUEV 报告、安全概念说明和定性系统 FMEA，进一步帮助设计人员实现 STO 子系统
- 安全转矩关闭 (STO) 子系统适用于具有 CMOS 输入隔离式 IGBT 栅极驱动器 (如 ISO5852S、UCC21750 或 UCC53x0) 的三相逆变器
- ISO1211 符合 IEC 61131-2 标准且具有 $\pm 60V$ 输入容差和反极性保护功能的 24V 隔离式输入接收器
- 连接 MCU (SIL 1)，为 STO 子系统负载开关提供诊断
 - 可通过 RDY 引脚监控 ISO5852S 栅极驱动器的输入和输出电源 UVLO
 - 可通过 UCC21750 集成式模拟至 PWM 隔离式传感器提供额外的监控功能
- 24V 隔离式 STO_FB 输出指示驱动状态：安全状态 (STO) 或正常运行

应用

- 电机驱动系统
- 伺服驱动器功率级模块
- 交流驱动器功率级模块
- 机器人伺服驱动器



1 系统说明

电机驱动器广泛用于各种应用，例如计算机数控 (CNC)、机器人、磨床、过程控制等等。这些应用通常需要基于驱动的安全功能来降低意外和危险移动所带来的风险。驱动器内部的集成式安全功能可取代那些安装起来既费时又成本高昂的外部安全组件，如主接触器或电机接触器。此外，电子开关速度明显快于接触器或继电器等机电设备。集成式安全功能可降低危险区域中的人身伤害风险以及安装要求。

“安全转矩关闭” (STO) 功能就是这样一项实用的安全功能。可以在发生系统故障时请求或触发 STO。IEC 61800-5-2 将 STO 定义为防止扭矩生成电力向电机供电的功能。按照 IEC 60204-1 的停止类别 0，此安全子功能对应于不受控制的停止。在需要断电的情况下，STO 安全功能也非常有用，可防止意外启动。

此 STO 参考设计根据 IEC/EN 61800-5-2 实现了具有 1 (HFT = 1) 故障容错功能的双通道架构 (1oo2)。只要两个 STO 输入端都出现逻辑 1 (+24V 直流)，电机就可以运行。如果一个或两个 STO 输入端为逻辑 0 (0V 直流) 时，将通过负载开关切断六个隔离式 IGBT 栅极驱动器的初级侧和次级侧相应电源，断开栅极驱动器 IC 的电源电压会禁用隔离式栅极双极晶体管 (IGBT)，从而禁用扭矩生成的电量。

此参考设计需对两个隔离式 STO 信号进行电路级实现，以通过 CMOS 输入关闭隔离式栅极驱动器的 VCC1 和 VCC2 电源。已经在各个点提供监控功能，以便进行诊断和故障检测。假定微控制器 (SIL 1 MCU) 会通过监控 STO 输入信号以及诊断反馈信号来运行 STO 硬件的诊断。MCU 和相关诊断软件不是此参考设计的一部分。随 STO_FB 信号提供了驱动状态反馈。

本设计指南通过各种测试结果中提取的数据来验证各设计规格的功能。

此 STO 参考设计硬件架构 (1oo2) 经过 TUEV SUEV 评估，通常符合 SIL 3 和 PL e/Cat 3 标准。可提供 TUEV 报告 (6)、定性系统 FMEA 和系统说明 (7)，进一步帮助设计人员实现 STO 子系统。

1.1 关键系统规格

表 1-1. 关键系统规格

参数	值	注释
安全功能	STO	安全转矩关闭功能符合 IEC 61800-5-2 标准
硬件故障容错 (HFT)	HFT = 1 (1oo2)	
IEC 61508 SIL 级	SIL 3	
ISO 13849	类别 3 PL e	
按需触发模式	连续	
SFF/DC	≥ 90% (HFT = 1)	Cat3 PL e, 中等 DC ≥ 90%
PFH	< 10 ⁻⁷	量化分析不是本概念研究的一部分
STO 响应时间	10 ms (标称值)、200 ms (最大值)	低电平有效 STO 和栅极驱动输出 (V _{GS}) 低电平 (也即功率 IGBT 处于关闭状态) 之间的时间。量化分析不是本概念研究的一部分。
DTI (诊断测试间隔)	100ms (10Hz)	量化分析不是本概念研究的一部分。诊断功能会以至少以 10 Hz 运行 (STO_1 的负载开关和 STO_2 的负载开关)。
FRT (故障响应时间)	< 200 ms	
传输时间 (TM)	20 年	
STO 输入电压范围	24V 直流 ±15% (标称值) ±60V 直流绝对最大值	
STO 输入逻辑电平, 有效 > 2ms	15V 至 30V 直流: 未使用 STO 功能 < 10V 直流: 已使用 STO 功能	STO 为低电平有效逻辑输入。输入经过低通滤波来消除 OSSD 脉冲。有效 STO 为 > 2 ms。
支持 OSSD 测试脉冲	测试脉冲持续时间 < 1 ms, 最大重复频率 500 Hz	添加了低通滤波器来消除 (滤除) 测试脉冲, 从而避免触发 STO。OSSD 脉冲诊断功能会以 250 Hz (4ms 速率) 运行。
STO 反馈 (STO_FB)	24V 直流 (隔离式)	指示驱动器的状态 (安全状态或正常运行), 并可在必要时用于将驱动器的状态反馈给安全 PLC 以进行额外的诊断。
直流电源电压	24V 直流 ±15% (标称值)	
隔离式栅极驱动器电源电压	逻辑电源: 3V3 至 5V (标称值) 输出电源: +15V/- 8V (标称值)	电源轨需要受到保护, 以保持在所选隔离式栅极驱动器的最大建议工作电压以下
工作环境温度	- 40°C 至 85°C	
连接至 MCU	3.3 V I/O	请参阅表 3-1 至表 3-4

2 系统概述

2.1 方框图

图 2-1 显示了整个系统。该系统包含 TIDA-01599 参考设计、诊断 MCU (SIL 1) (不是 TIDA-01599 设计的一部分)、一个隔离式直流/直流栅极驱动电源 TIDA-00199⁽¹⁾，以及一个具有 CMOS 输入隔离式栅极驱动器的三相 IGBT 功率级，与使用 TIDA-00195⁽²⁾ 等实现的系统相同。

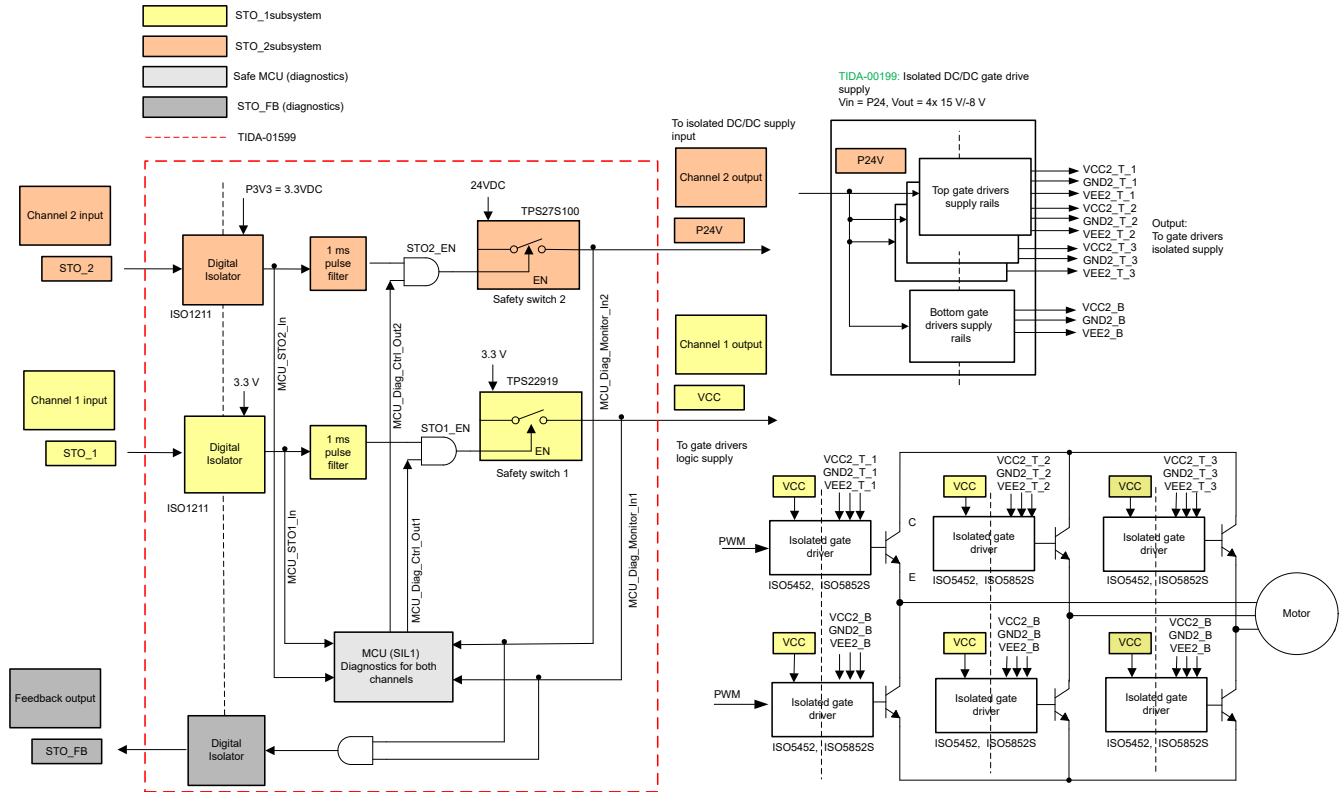


图 2-1. 采用 TIDA-01599 时的系统方框图

TIDA-01599 参考设计通过 ISO1211 集成了两个用于 STO_1 和 STO_2 信号的 24V 隔离式输入。OSSD 脉冲由低通滤波器提供支持，该滤波器应该能够抑制小于 1 ms 的 STO 脉冲。STO_1 和 STO_2 子系统提供了相应的电源电压 P24V 和 VCC。STO_1 和 STO_2 信号分别通过电源开关 TPS22919 和高侧开关 TPS27S100 控制六个隔离式 IGBT 栅极驱动器的初级侧 (VCC) 和次级侧 (P24V) 电源。P24V 是指隔离式直流/直流转换器 TIDA-00199 的 24V 输入电压。TIDA-00199 电路板接受容差为 $\pm 20\%$ 的 24V 电压，并提供四个隔离式偏置电压组 (15V、-8V)。在此设计中，TIDA-00199 用于向六个隔离式 IGBT 栅极驱动器的次级侧提供双极电源。VCC 是六个隔离式栅极驱动器初级逻辑侧的电源电压。

只要两个 STO 输入端都出现逻辑 1 (+24V 直流)，电机就可以运行。如果一个或两个 STO 输入端出现逻辑 0 (0V)，栅极驱动器的电源会断开，并且电机将滑行至零。使用 1oo2 架构有助于实现 HFT = 1，并且只有两个同时发生故障时才会导致安全功能故障。

STO_FB 信号用于指示驱动器的状态 (安全状态或正常运行)，并可在必要时用于将驱动器的状态反馈给安全 PLC 以进行额外的诊断。

诊断信号会路由至兼容 LaunchPad™ 的 3.3V 接口，以便连接到 C2000 MCU 等 MCU (SIL 1) 来运行相应的诊断和监控软件。MCU (SIL 1) 和软件不是此设计的一部分。

2.2 设计注意事项

2.2.1 使用条件：假设

请参阅图 2-1，以了解安全元件的系统结构方框图，其中安全元件为 STO_1 和 STO_2 安全子系统以及在 MCU (SIL 1) 上运行的诊断软件。以下列表概述了各种假设，这些不在此设计的讨论范围内。

2.2.1.1 一般假设

- PCB 设计：PCB 设计的共因故障不在本设计指南的讨论范围内。
- 在实现此设计时必须评估过压和欠压保护电路。超出本活动的范围。
- 在实现此设计时必须评估诊断和任何固件。超出本活动的范围。
- 在实现此设计时必须评估常见诱致因素并确定 β 因子和 CCF。超出本活动的范围。
- 在实现此设计时必须评估定量分析 (PFH、MTTFd 等等)。超出本活动的范围。

2.2.1.2 特定假设

- 输入信号 STO_1 和 STO_2。
 1. 输入电压介于 0V 和 24V 标称值之间，最坏情况下为 3.6V (用作逻辑低电平) 和 20.4V (用作逻辑高电平)。预计没有中间电压。
 2. 假定 STO 信号上的逻辑低电平 (诊断脉冲) 小于 1 ms 或大于 2 ms。不允许采用中间值。
- STO_1 和 STO_2 与 STO_FB 子系统的诊断覆盖
 1. MCU 及相关诊断软件不在分析范围内，并假定为根据功能安全要求进行开发。假定 MCU 通过了 SIL 1 认证并相应地实现了软件以至少满足 SIL 1。
- 输出信号 STO_FB：
 1. 假定输出电压介于 0V 和 24V 标称值之间，最坏情况下为 3.6V (用作逻辑低电平) 和 20.4V (用作逻辑高电平)。假定 24V STO_FB 的外部电源具有过压保护功能，并需要保持在 24V \pm 20% 容差范围内。
- STO_1 和 STO_2 子系统的电源轨
 1. P3V3 电源：假定具有故障保护功能并保持在 \pm 20% 容差 (最大值 3.9V，最小值 2.7) 范围内。如果超出范围，它将关断至 0V。当单个受保护的电源用于 STO_1 和 STO_2 子系统时，它应当采用两个独立的保护电路 (HFT = 1)。
 2. 24V 电源：假定 P24V 的 24V 输入电源具备故障保护功能并保持在 \pm 20% 容差范围内。如果超出范围，它将关断至 0V。
- 隔离式栅极驱动电源 TIDA-00199
 1. 假定在 P24V 直流输入电压断开后，四路输出轨 (VCC2 = +15V，VEE2 = -8V) 会在 10 ms 内衰减至 0V。
 2. 假定 TIDA-00199 的所有故障都是安全的，并且会为所有四路输出轨 VCC2 和 VEE2 生成 0V 输出电压。
- 温度
 1. 假定组件在推荐的工作结温范围内工作。需要添加温度传感器，如果环境温度不在建议的工作温度范围内，所有安全相关电源都将关断。此电路不是此设计的一部分。

2.2.2 诊断覆盖范围

2.2.2.1 双通道监控

STO 功能分别通过双通道 STO_1 和 STO_2 实现来切断栅极驱动器的电源 (请参阅图 2-2)。在安全单元中，如果其中一个 STO 信号被移除，则状态变为“已触发 STO” (请参阅表 2-1)。然后，该单元需要等待一段固定的监控时间，以检查两个输入端是否关闭。如果会话之后两个输入端上未出现相同信号，则系统会发出错误信号。PLC 通过 1 ms OSSD 脉冲定期检查两条停止路径是否存在错误，以这种方式来执行监控 (请参阅表 2-2)。

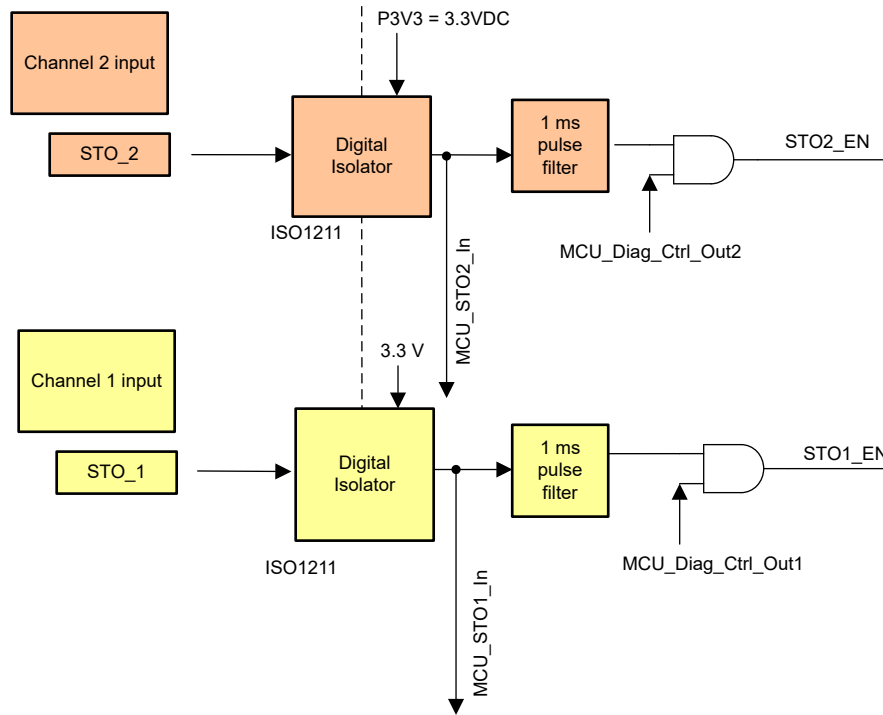


图 2-2. 双通道隔离式 STO

表 2-1. 双通道隔离式 STO

STO_1	STO_2	状态说明
0	0	STO 状态被触发，并且 STO 功能没有出错。
0	1	STO 状态被触发，并且开始监控是否存在错误。一段时间后，发出错误信号
1	0	STO 状态被触发，并且开始监控是否存在错误。一段时间后，发出错误信号
1	1	STO 状态未被触发

在 TIDA-01599 中，假定 MCU (SIL 1) 会执行诊断覆盖。MCU 不是分析功能的一部分。也可以使用基于硬件的诊断覆盖。表 2-2 显示了诊断逻辑和状态。请注意，STO 相关信号处于低电平有效状态。

表 2-2. MCU 诊断逻辑表

STO_1 STO_2	MCU_STO_1 _in MCU_STO_2 _in	MCU 诊断：检测到故障	MCU_Diag_Cntrl_Out1 MCU_Diag_Cntrl_Out2	IGBT 栅极驱动器输出	状态
1 1	1 1	否	正常运行	正常运行	正常运行
1 1	1 1	是 (例如，负载开关卡在高电平)	0	0	安全状态
1 1	1 1	是 (例如，无 OSSD 脉冲)	0	0	安全状态
0 0	0 1	是 (例如，ISO1211 卡在高电平)	0	0	安全状态
0 0	1 0	是 (例如，ISO1211 卡在高电平)	0	0	安全状态
0 0	0 0	否	0	0	STO

2.2.2.2 通过 MCU (SIL1) 检查 ISO1211 功能

如前所述，PLC 向 ISO1211 器件的输入端发送 1 ms OSSD 逻辑低电平测试脉冲。它会定期监控来自相应 ISO1211 输出的信号 MCU_STO1_In 和 MCU_STO2_In，确保数字隔离器工作正常。如果超过 4 ms 未检测到逻辑低电平，MCU 便会认为相应的 ISO1211 输出卡在高电平或短接至 VCC，并通过将诊断脉冲 MCU_Diag_Cntrl_Out1 和 MCU_Diag_Cntrl_Out2 持续驱动至低电平，将三相 IGBT 逆变器置于安全状态。这进而会禁用六个栅极驱动器，同时六个 IGBT 将会关断并且驱动器将会进入安全状态。

2.2.2.3 通过 MCU (SIL1) 检查 TPS22919 功能

出于诊断目的，MCU 接口会定期发送 200 μs 逻辑低电平脉冲 MCU_Diag_Cntrl_Out1。开关的输出端连接至 MCU (Monitor_1) 的 GPIO 和 STO_FB 子系统作为 STO_1_FB 输入，如图 2-3 所示。

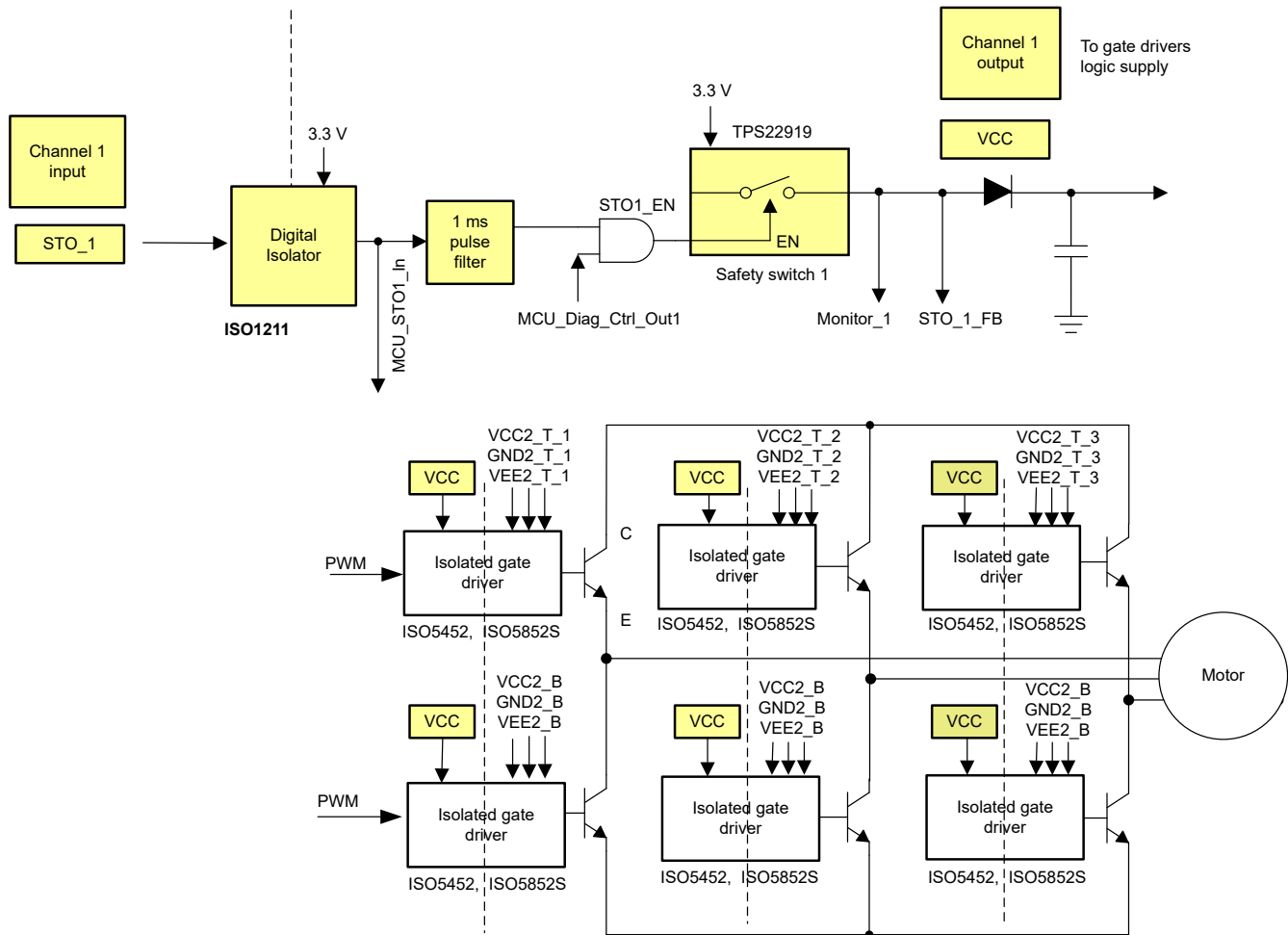


图 2-3. STO_1 信号流路径

在这些周期性脉冲期间，栅极驱动器不会关闭。使用 $0.47 \mu\text{F}$ 电容器来保持 3.3V 初级电源电压。Monitor_1 表示 TPS22919 开关的状态，该状态会反馈至 MCU。如果发现短路或卡在高电平，MCU 便会将诊断脉冲 MCU_Diag_Ctrl_Out1 和 MCU_Diag_Ctrl_Out2 持续驱动至低电平，以将三相 IGBT 逆变器置于安全状态。这进而会禁用六个栅极驱动器，同时六个 IGBT 将被关断并且驱动器将会进入安全状态。

另外，STO_1_FB 是一个低电平有效信号，用于指示负载开关状态并与另一通道 STO_2_FB 一同指示驱动状态。例如，此状态可由外部安全 PLC 用来识别 STO_1 或 STO_2 系统中的单一故障并采取适当的措施。安全 PLC 及相关行为不在本参考设计的讨论范围内。

2.2.2.4 通过 MCU (SIL1) 检查 TPS27S100 功能

MCU 接口会定期发送 $200 \mu\text{s}$ 逻辑低电平脉冲 MCU_Diag_Ctrl_Out2 以进行诊断。如图 2-4 所示，使用电阻分压器网络将开关的输出端连接到 MCU (Monitor_2) 的通用输入/输出 (GPIO) 端。另外还连接到 STO_FB 子系统作为 STO_2_FB 输入。

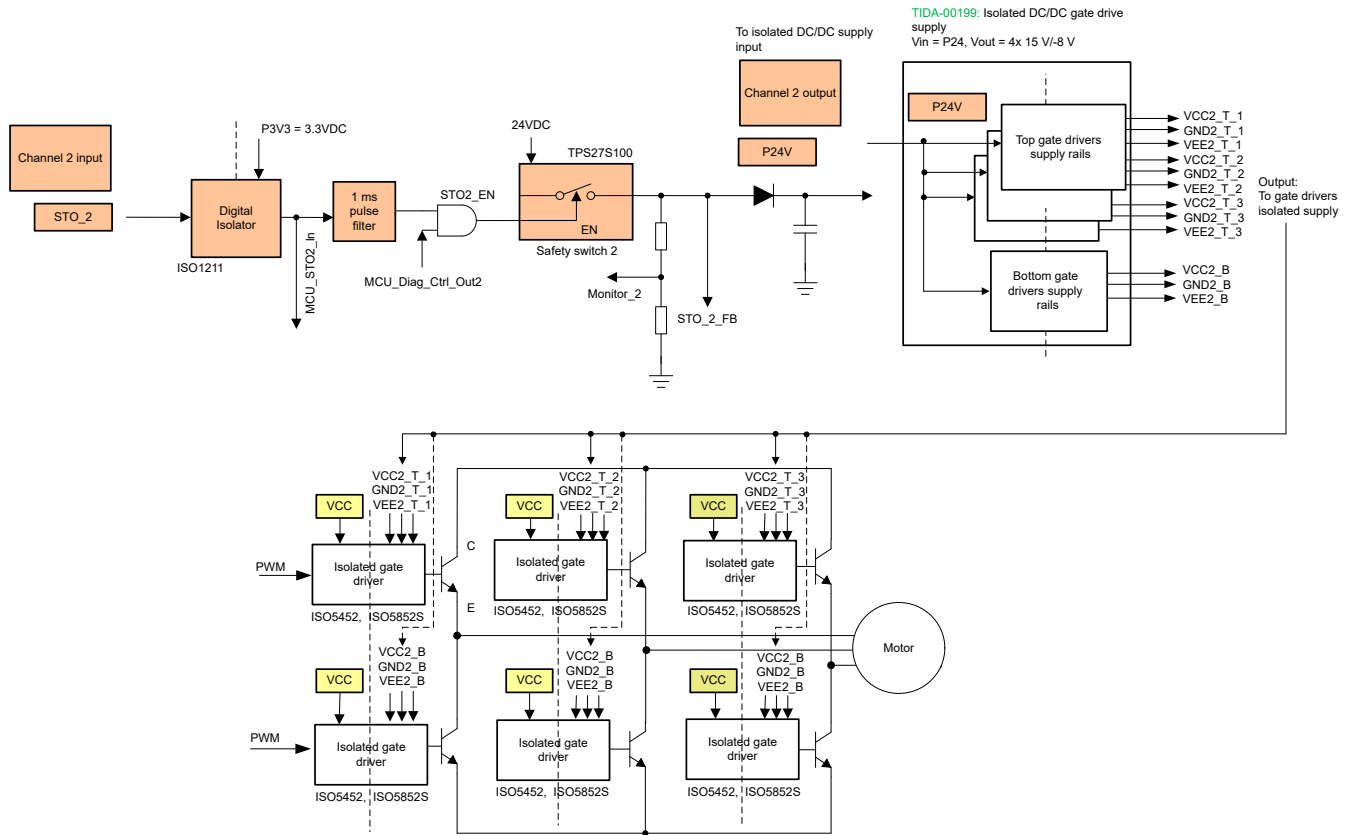


图 2-4. STO_2 信号流路径

在这些周期性脉冲期间，栅极驱动器不会关闭。此参考设计使用 20 μ F 电容器来保持 24V 次级电源电压。TPS27S100 开关通过精确监控输出电流来提供全面的诊断功能。输出电流将转换成瞬时流量，然后馈送回 MCU，此功能可实现对负载的智能控制。如果发现短路或卡在高电平，MCU 便会通过将诊断脉冲 MCU_Diag_Ctrl_Out1 和 MCU_Diag_Ctrl_Out2 持续驱动至低电平，将三相 IGBT 逆变器置于安全状态。这进而会禁用六个栅极驱动器，同时六个 IGBT 将被关断并且驱动器将会进入安全状态。

另外，STO_2_FB 是一个低电平有效信号，用于指示负载开关状态并与另一通道 STO_1_FB 一同指示驱动状态。例如，此状态可由外部安全 PLC 用来识别 STO_1 或 STO_2 系统中的单一故障并采取适当的措施。安全 PLC 及相关行为不在本参考设计的讨论范围内。

2.2.2.5 利用 ISO5452、ISO5852S 或 UCC21750 集成式模拟至 PWM 隔离式传感器的 RDY 引脚实现可选的监控功能

ISO5452/ISO5852S 器件的 I/O 电路与 MCU 相连，该电路由栅极驱动控制 (IN+/IN-) 输入、复位 (RST) 输入、就绪 (RDY) 警报输出和故障 (FLT) 警报输出组成。如果 VCC1 电源降至 VIT- (UVLO1) 以下，无论 IN+、IN- 和 RST 输入如何，栅极驱动器的输出端都将关闭，直到 VCC1 上升至高于 VIT+ (UVLO1)。与此类似，如果 VCC2 电源降至 VIT- (UVLO2) 以下，无论 IN+、IN- 和 RST 输入如何，栅极驱动器的输出端都将关闭，直到 VCC2 上升至高于 VIT+ (UVLO2)。

就绪 (RDY) 引脚指示输入侧与输出侧 UVLO 内部保护功能的状态。如果器件任一侧的电力不足 (VCC1 或 VCC2)，RDY 引脚输出将会变低；如果电力充足，RDY 引脚输出将会变高。

除了 RDY 引脚外，UCC21750 还在 AIN 至 APWM 引脚上具有隔离式模拟至 PWM 信号功能，因此能够实现隔离式温度感测、高压直流总线电压感测等额外的系统监控功能。

2.2.3 驱动状态

安全状态由以下事件触发：

1. 低电平有效 STO_1 输入信号请求安全转矩关闭
2. 低电平有效 STO_2 输入信号请求安全转矩关闭
3. STO_1 或 STO_B 子系统的诊断覆盖 (ISO1211 和响应的负载开关) 危险故障检测
4. 安全电源电压 P24V、P3V3 或 STO_1 和 STO_2 子系统的相应逻辑电源电压被中断

驱动状态反馈 STO_FB 子系统

STO_FB 信号为逻辑低电平信号，用于指示驱动状态。高电平信号 (逻辑电平 1) 表示正常驱动运行，而低电平信号 (逻辑状态 0) 表示处于安全驱动状态。原理图如图 2-5 所示。相应 STO_1 和 STO_2 安全子系统的输出信号 STO_1_FB 和 STO_2_FB 会逻辑组合成单个低电平有效反馈信号 STO_FB 并发送至隔离式 24V 数字输出。表 2-3 中显示了相应的逻辑状态。

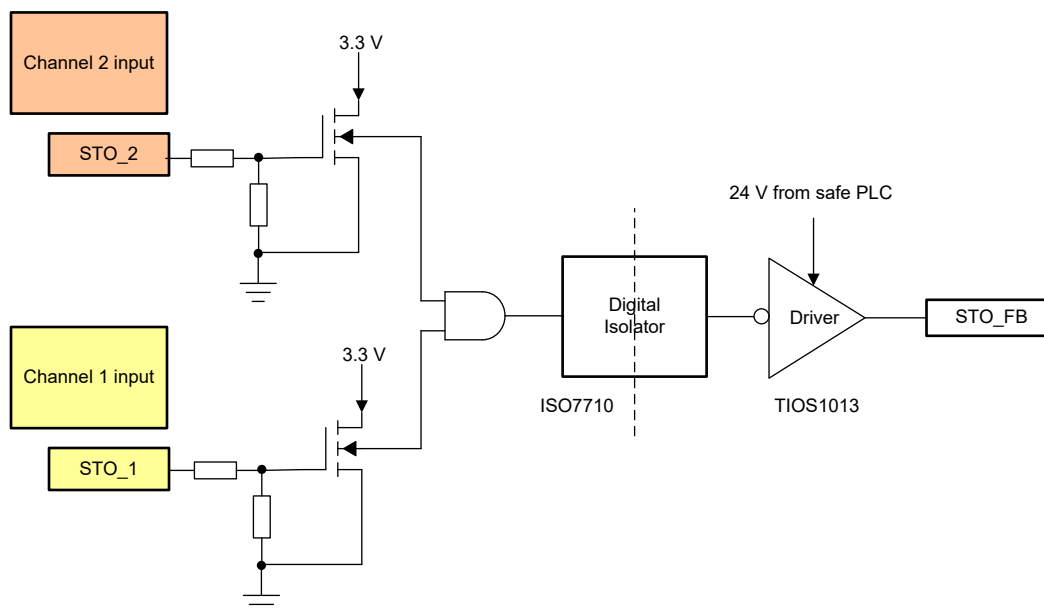


图 2-5. STO_FB 反馈监视子系统

表 2-3. STO 反馈诊断逻辑表

输入 1： STO_1	输入 2： STO_2	输出 1： STO_1_FB	输出 2： STO_2_FB	驱动状态	STO_FB	注释
1	1	1	1	正常运行	1	
0	0	0	0	安全状态 (关闭)	0	
1	1	0	1 (卡在高电平故障)	安全状态 (关闭)	0	(1) MCU 已经检测到子系统 STO_2 中的单个危险故障 (卡在高电平), 并已经通过 STO_1 子系统触发安全状态。
1	1	1 (卡在高电平故障)	0	安全状态 (关闭)	0	(2) MCU 已经检测到子系统 STO_1 中的单个危险故障 (卡在高电平), 并已经通过 STO_2 子系统触发安全状态。
0	0	0	1	安全状态 (关闭)	0	之前可能已检测到单个检测到的故障, 请参阅上一行中的 (1)。
0	0	1 (卡在高电平故障)	0	安全状态 (关闭)	0	之前可能已检测到单个检测到的故障, 请参阅上一行中的 (2)。
0	0	1 (卡在高电平故障)	1 (卡在高电平故障)	正常运行	1	危险状态, 由两个危险故障造成, 安全子系统 STO_1 和 STO_2 中各有一个。注意: 该系统设计为支持单一容错 (HFT=1), 而不是允许发生两个故障, 每个子系统各一个。

STO_FB 信号可以为低电平有效 (逻辑状态 0), 而 STO_1 和 STO_2 均为高电平无效 (逻辑状态 1)。当诊断 MCU (SIL 1) 在 STO_1 或 STO_2 子系统其中一个上检测到单一危险故障时, 便会出现此状态。如果发现短路或卡在高电平, MCU 便会将诊断脉冲 MCU_Diag_Ctrl_Out1 和 MCU_Diag_Ctrl_Out2 持续驱动至低电平, 以将三相 IGBT 逆变器置于安全状态。例如, 此状态可由外部安全 PLC 用来识别 STO_1 或 STO_2 系统中的单一故障并采取适当的措施。安全 PLC 及相关行为不在本设计的讨论范围内。

2.3 重点产品

2.3.1 ISO1211

图 2-6 显示了 ISO1211 的引脚图。ISO1211 器件是符合 IEC 61131-2 1、2 和 3 类特性标准的隔离式 24V 至 60V 数字输入接收器，适用于可编程逻辑控制器 (PLC) 和电机控制数字输入模块。不同于具有分立式、不精确电流限制电路的传统光耦合器解决方案，ISO121x 器件提供一个具有精确电流限制功能的简单低功耗解决方案，可实现紧凑型和高密度 I/O 模块设计。这些器件不需要现场侧电源。

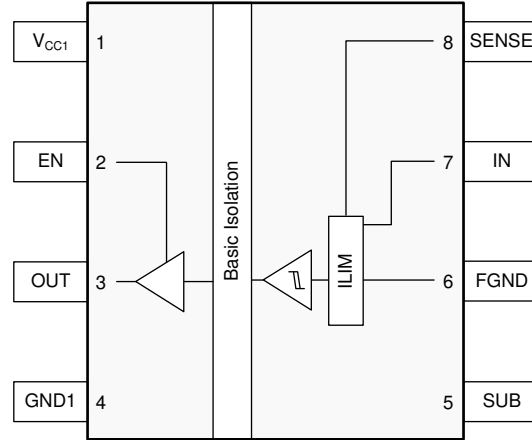


图 2-6. ISO1211 引脚图

2.3.2 TPS27S100

图 2-7 显示了 TPS27S100 功能方框图。TPS27S100 是一款受到全面保护的单通道高侧开关，具有集成式 NMOS 和电荷泵。可调节电流限制功能能够极大地提高整个系统的可靠性。器件诊断报告具有两个版本，以支持数字故障状态和模拟电流监控器输出。凭借精确的电流监控器和可调节电流限制功能，该器件在市场上脱颖而出。

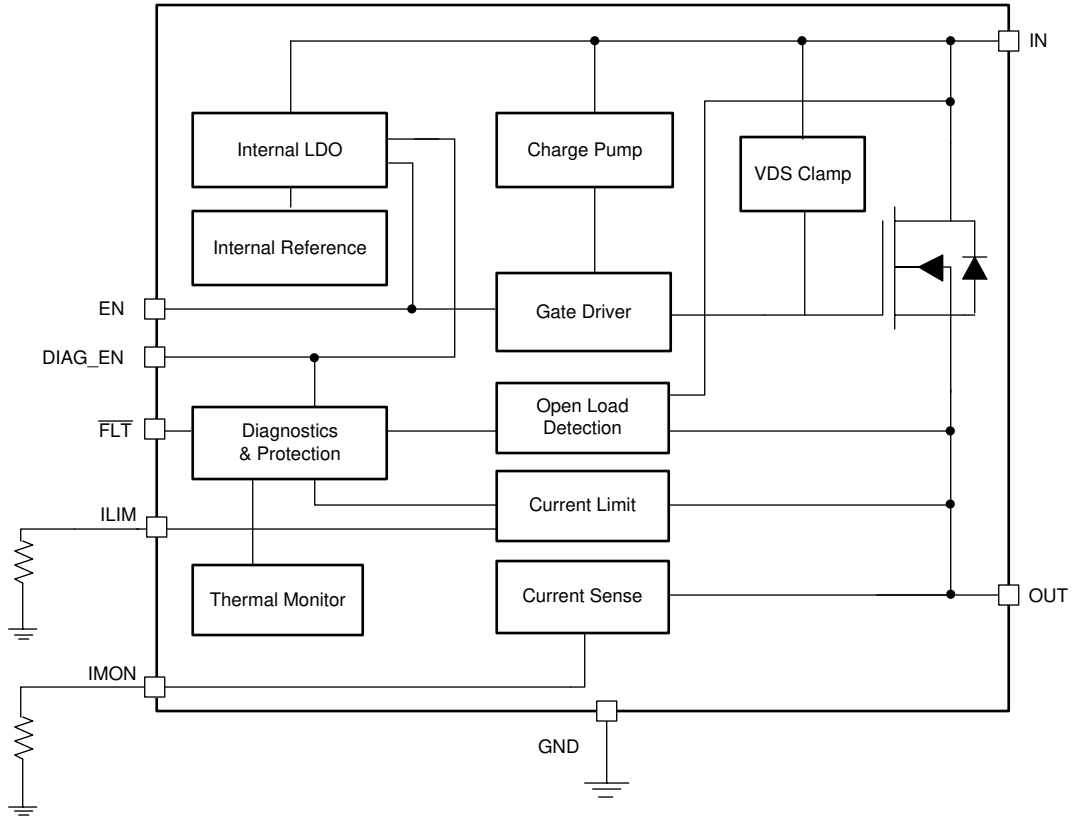


图 2-7. TPS27S100 功能方框图

2.3.3 TPS22919

图 2-8 显示了 TPS22919 功能方框图。TPS22919 是一款具有受控压摆率的小型单通道负载开关。它具备短路保护功能，最大可支持 1.5A 的持续电流。该开关由可与低压控制信号直接连接的开关输入 (ON 引脚) 控制。

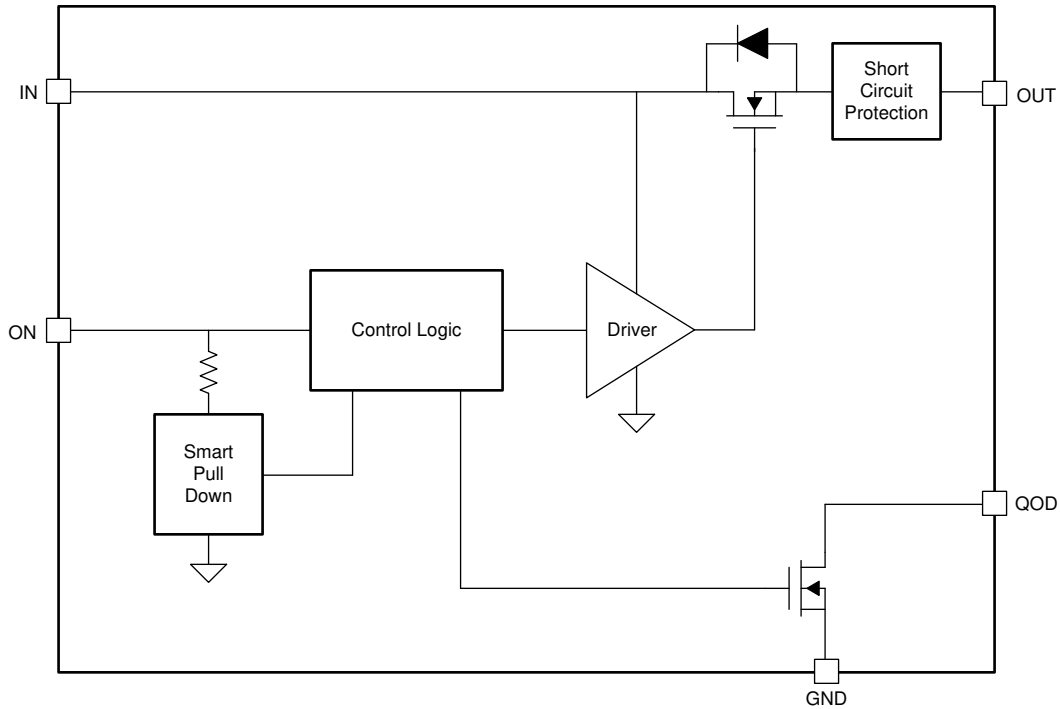


图 2-8. TPS22919 功能方框图

2.3.4 ISO5852S、ISO5452

ISO5852S 和 ISO5452 是适用于 IGBT 和 MOSFET 的隔离智能栅极驱动器。输入 CMOS 逻辑和输出功率级由二氧化硅 (SiO₂) 电容隔离进行隔离。图 2-9 所示为功能方框图。

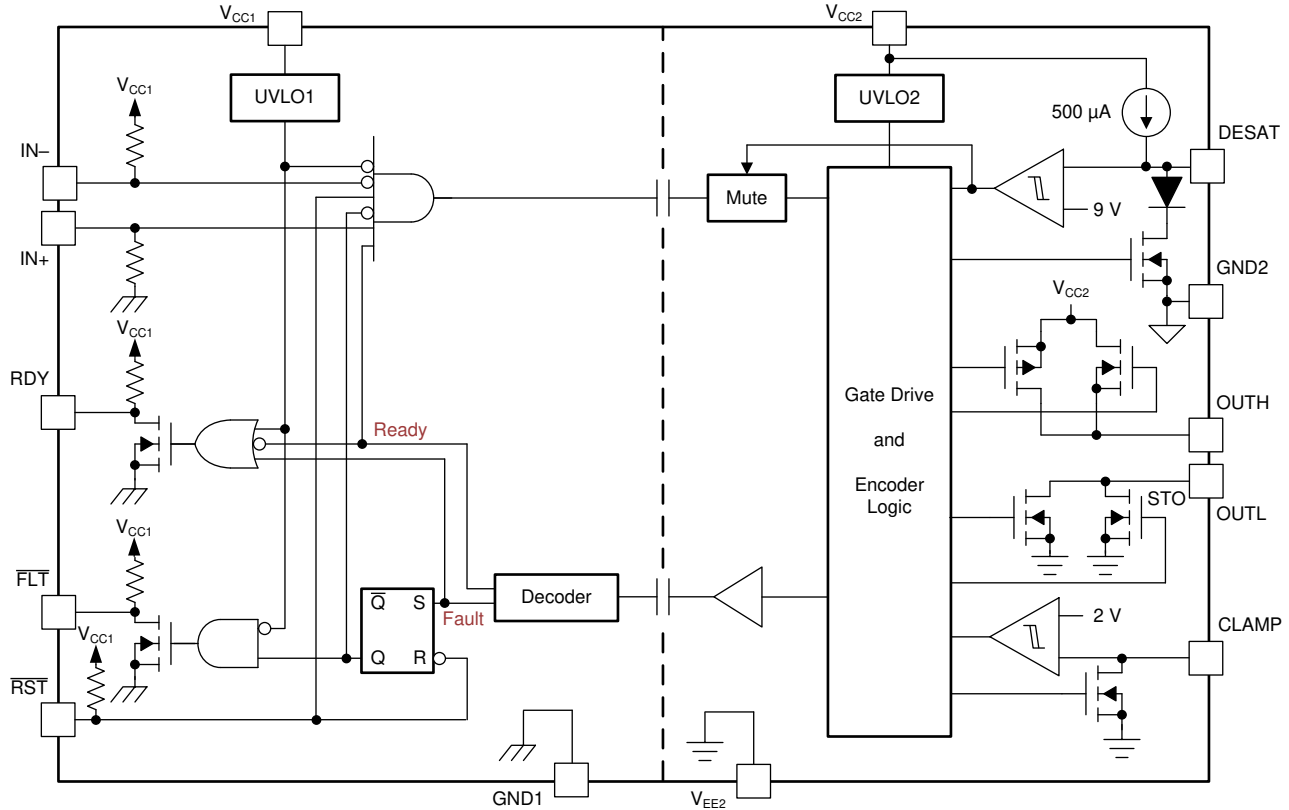


图 2-9. ISO5852S/ISO5452 功能方框图

输入侧的 I/O 电路与 MCU 相连，该电路由栅极驱动控制 (IN+|IN-) 输入、复位 (RST) 输入、就绪 (RDY) 警报输出和故障 (FLT) 警报输出组成。功率级包含功率晶体管 (用于提供 2.5A 上拉电流和 5A 下拉电流来驱动外部功率晶体管的容性负载)，以及 DESAT 检测电路 (用于在短路期间监控 IGBT 是否发生集电极-发射极过压)。电容隔离内核由发送电路 (用于跨电容式隔离层耦合信号) 和接收电路 (用于将产生的低摆幅信号转换为 CMOS 电平) 组成。ISO5852S/ISO5452 还包含欠压锁定 (UVLO) 电路，可用于防止对外部 IGBT 的栅极驱动不足。此外，它还提供有源输出下拉功能，可确保栅极驱动器输出在输出电源电压不存在时保持低电平。ISO5852S/ISO5452 还具有有源米勒钳位功能，可用于防止米勒效应导致的以下情况发生：外部功率晶体管为进行单极电源操作而接通寄生。

2.4 系统设计原理

2.4.1 用于 STO 的数字输入接收器

ISO1211 可接收 24V 数字信号，并提供隔离式数字输出，无需现场侧电源。输入信号路径上的外部电阻器 (R12 和 R21) 可精确设置现场输入中的电流消耗限值。此电流限值有助于最大限度地降低系统中耗散的功率。可为 1 型、2 型或 3 型操作设置此电流限值。电压转换阈值符合 1 型、2 型和 3 型要求，并且可使用外部电阻器 (R22 和 R15) 完成进一步提升。这两个电阻器都是碳素 MELF (防脉冲) 型电阻器，用于提供浪涌保护。详细测试结果，请参阅 [如何设计隔离式数字输入模块来提高浪涌抗扰度](#) 应用简报。

图 2-10 显示了 ISO1211 接收器的原理图。

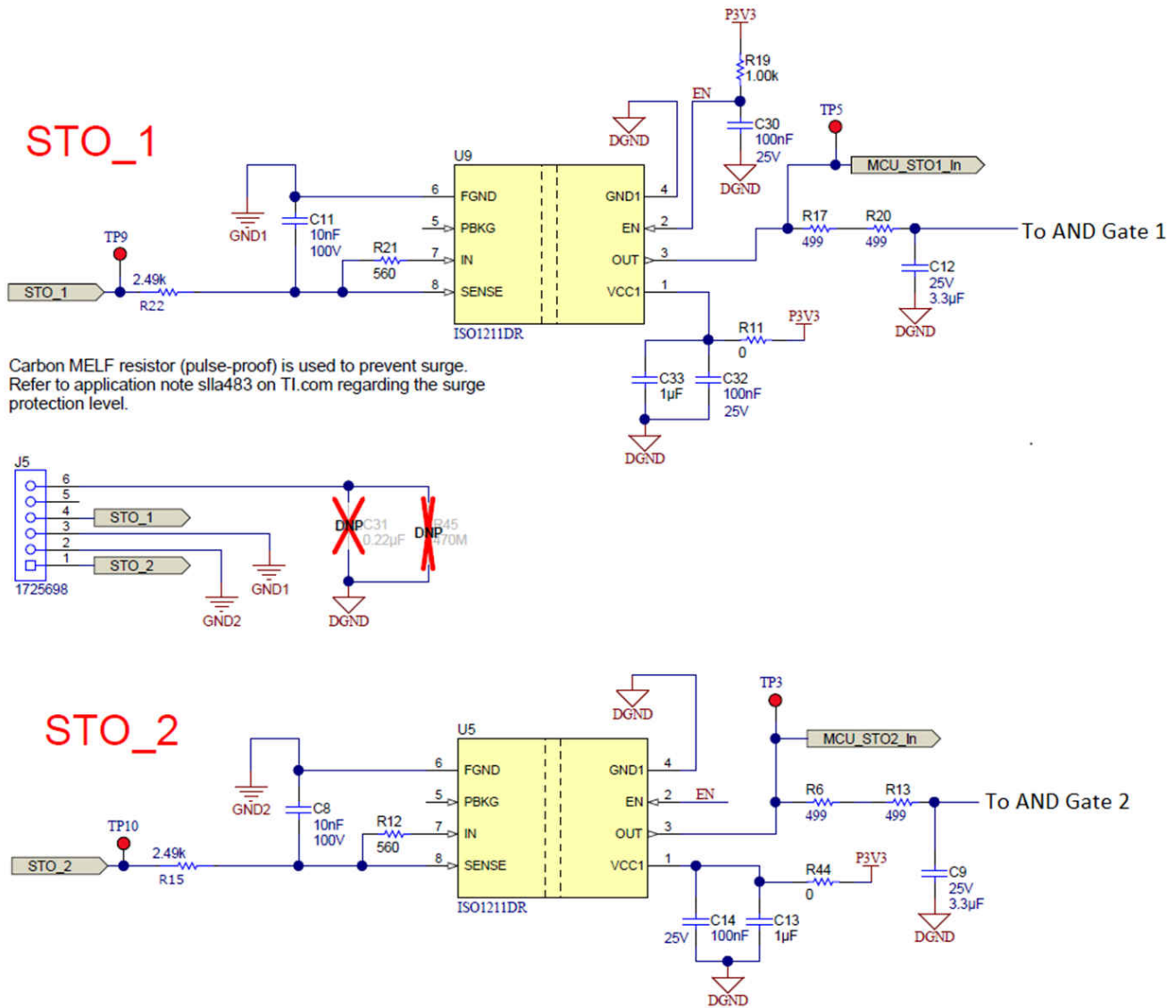


图 2-10. ISO1211 原理图

根据设计规范，为 24V 输入电压定义的电压限值如下所示：

1. 15V 至 30V 直流：未使用 STO 功能（允许运动）
2. 0V 至 5V 直流：已使用 STO 功能（禁止运动）

这些设计要求符合 1 型特性。

如图 2-10 所示，1 型操作针对 R12 和 R21 使用 560 Ω 的值，电流限制为 2.25 mA（典型值）。R_{SENSE} 电阻器和典型电流限值 (I_L) 之间的关系由方程式 1 给定。

$$I_L = \frac{2.25 \text{ mA} \times 562 \Omega}{R_{\text{SENSE}}} = \frac{2.25 \text{ mA} \times 562 \Omega}{560 \Omega} = 2.25 \text{ mA} \quad (1)$$

除限制浪涌电流以外，电阻器 R22 和 R15 还设置电压阈值 (V_{IH} 和 V_{IL})。针对 1 型系统的 R22 和 R15 使用 2.5k Ω 电阻器。方程式 2 和方程式 3 分别用于计算 V_{IH} 和 V_{IL} 的典型值。

$$V_{IH(\text{TYPICAL})} = 8.25 \text{ V} + R22 \times \frac{2.25 \text{ mA} \times 562 \Omega}{R21} = 8.25 \text{ V} + 2.5 \text{ k}\Omega \times \frac{2.25 \text{ mA} \times 562 \Omega}{560 \Omega} = 13.875 \text{ V} \quad (2)$$

$$V_{IL(\text{TYPICAL})} = 7.1 \text{ V} + R22 \times \frac{2.25 \text{ mA} \times 562 \Omega}{R21} = 7.1 \text{ V} + 2.5 \text{ k}\Omega \times \frac{2.25 \text{ mA} \times 562 \Omega}{560 \Omega} = 12.725 \text{ V} \quad (3)$$

请注意，对输入信号 STO_1 和 STO_2 使用的特定假设是，输入电压介于 0V 和 24V 标称值之间，最差情况下为 3.6V（用作逻辑低电平）和 20.4V（用作逻辑高电平）。逻辑高电平范围为 24V 直流 ±15%（标称值）以及 ±60V 直流（绝对最大值）。预计没有中间电压。

根据设计规范，低于 1 ms 的低电平 STO 脉冲会被抑制。可通过在 ISO1211 器件的输出信号上放置低通滤波器来解决这一抑制问题。若要满足设计要求，请放置 R = 1K 和 C = 3.3 μF 的 RC 组合（请参阅方程式 4）。

$$\text{Time Constant} = R \times C = 1\text{K} \times 3.3 \mu\text{F} = 3.3 \mu\text{sec} \quad (4)$$

此滤波器的截止频率是 48 Hz，其中：

- V(t) = 3.3
- 在 t = 1 ms 时
- V(t) = 2.8V，这些值均在与门的逻辑阈值高范围内。

在实现时，将 2 个 499Ω R17 和 R20 串联用于 STO 1 并将 2 个 499Ω R6 和 R13 串联用于 STO 2。这是为了摆脱电阻器的短路或更改值故障模式，而电阻器将会旁路逻辑门输入端的滤波器。

2.4.2 用于控制 VCC1 的 STO_1 信号流路径

TPS22919 是一款小型、超低泄漏电流、单通道负载开关。图 2-11 显示了 TPS22860 的原理图设计。

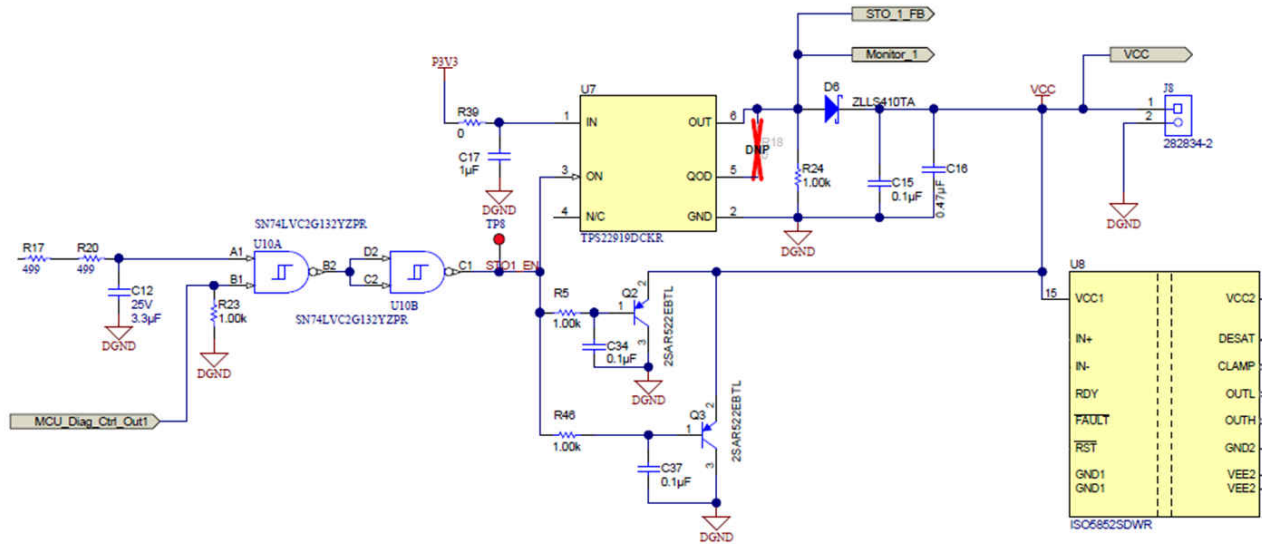


图 2-11. TPS22919 原理图

器件电源为 3.3V 并假定电源具备故障保护功能且能够保持在 $\pm 20\%$ 容差范围内。若要限制输入电源的压降（由开关导通时流入放电负载电容器的瞬态浪涌电流引起），应在 V_{IN} 和 GND 引脚之间放置一个 $1\ \mu\text{F}$ 的陶瓷电容器。

ON 引脚与标准 GPIO 逻辑阈值兼容，用于通过信号 STO1_EN 控制开关的状态。QOD 引脚会保持开路，并且在 ON 引脚处于逻辑低电平时，输出将保持浮动。

可使用方程式 5 来计算给定电容和压摆率条件下导通期间的浪涌电流。

$$I_{INRUSH} = \text{Slew Rate} \times C_{LOAD} = 2.3\text{mV}/\mu\text{s} \times 0.57\mu\text{F} = 1.311\text{mA} \quad (5)$$

开关的输出端连接至栅极驱动器 3.3V 电源的初级侧 (VCC)。在 STO_1 激活时，双冗余 PNP 双极结晶体管 Q2 和 Q3 会主动将逻辑侧栅极驱动器电源 VCC 钳制至 GND。这可防止 VCC 电源的反向偏置流过 CMOS 输入栅极驱动器 ISO5852S（或 ISO5452），以防 PWM 信号仍处于高电平有效 (3V3) 状态。

2.4.3 STO_2 信号流路径

2.4.3.1 用于控制栅极驱动器的次级侧电源电压的高侧开关

TPS27S100x 是一款受到全面保护的单通道高侧开关，具有集成式 NMOS 和电荷泵。该器件可从外部调节电流限值以钳制浪涌或过载电流，从而提升整个系统的可靠性。图 2-12 显示了 TPS27S100 的原理图设计。

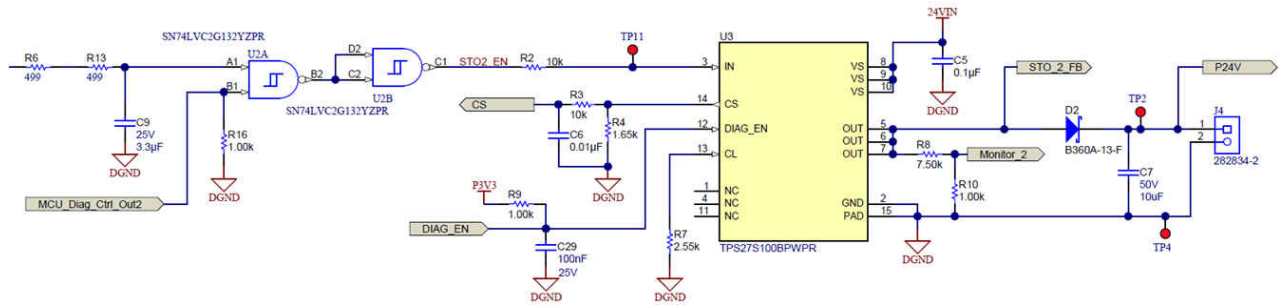


图 2-12. TPS27S100 原理图

器件电源为 24V 并假定电源具备故障保护功能且能够保持在 $\pm 20\%$ 容差范围内。引脚 3 支持通过 STO2_EN 信号控制通道激活。

方程式 6 计算电阻器 R4 的值，以使 1A 标称电流保持在 0 至 3.3V 电流感测范围内。若要实现更高的电流感测精度，建议首选具有 1% 或更佳容差的电阻器。

$$R4 = \frac{V_{(IMON)} \times K_{(IMON)}}{I_{OUT}} = \frac{3.3 \text{ V} \times 500}{1 \text{ A}} = 1.65 \text{ k} \quad (6)$$

电阻器 R4 的值选择为 1.65 k Ω 。电流感测 (CS) 引脚通过低通滤波器 (R3 和 C6) 连接到诊断 MCU (SIL 1) 的 ADC 输入端。

若要将可调电流限值设置为 1A，可使用方程式 7 计算 R7。

$$R7 = \frac{VLIM_{(TH)} \times K_{(ILIM)}}{I_{OUT}} = \frac{1.233 \text{ V} \times 2000}{1 \text{ A}} = 2.47 \text{ K} \quad (7)$$

电阻器 R7 的值选择为 2.55 k Ω 。

使能引脚永久连接到 3.3V，以实现持续诊断监控，同时还将信号发送回诊断 MCU (SIL 1)。

2.4.3.2 为次级侧供电：栅极驱动器的 VCC2

智能开关的输出端连接至 J4，以便为 TIDA-00199 电路板供电。TIDA-00199 设计会产生 +15V、0V 和 -8V 的双极电源，从而为 TIDA-01599 电路板上的隔离式栅极驱动器 ISO5852S 次级侧供电。有关详细设计流程，请参阅适用于三相逆变器的宽输入隔离式 IGBT 栅极驱动 Fly-Buck™ 电源设计指南。

2.4.4 栅极驱动器设计

图 2-13 显示了隔离式栅极驱动器的原理图设计。VCC1 和 GND1 为 ISO5452 或 ISO5852S 器件输入侧的电源引脚。VCC1 的电源电压范围为 3.0V 到 5.5V (相对 GND1)。VCC2 和 GND2 为 ISO5452 或 ISO5852S 器件输出侧的电源引脚。VEE2 为输出驱动器的电源返回点，GND2 为逻辑电路的参考地。VCC2 的电源电压范围为 15V 到 30V (相对 VEE2)。PWM 应用于栅极驱动器的 IN+ 和 IN- 引脚中。

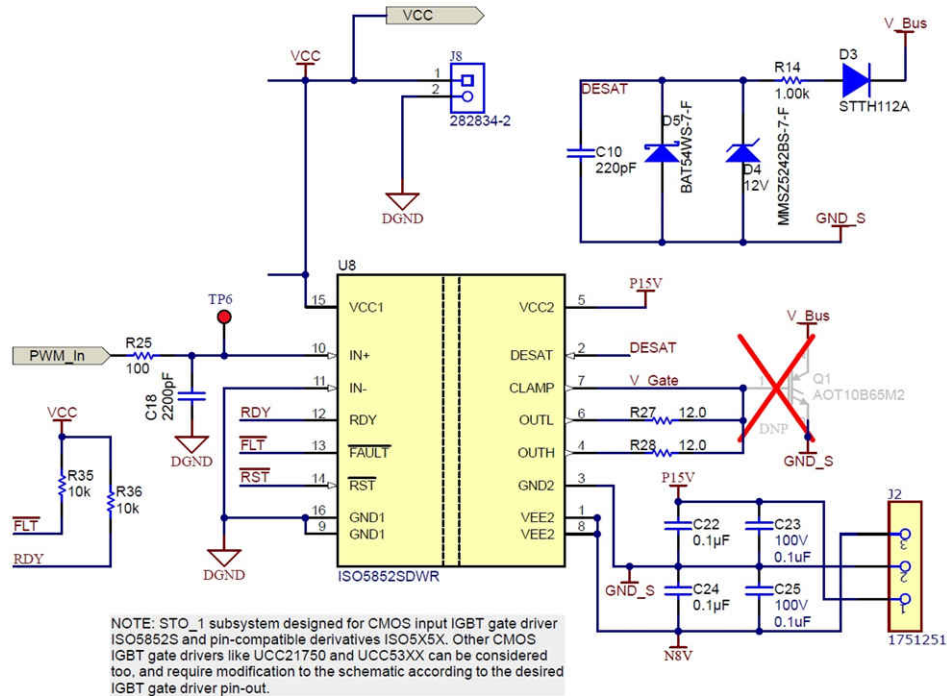


图 2-13. ISO5852S 原理图

在栅极驱动器次级侧，栅极电阻器 R27 和 R28 控制开关器件的栅极电流。DESAT 故障检测有助于防止短路故障期间集电极电流过多而造成任何损害。为防止开关器件受损，ISO5452、ISO5852S 会在检测到故障时缓慢关闭 IGBT。缓慢关闭可确保出现故障时以可控方式降低过流。DESAT 二极管 D3 传导源自栅极驱动器的偏置电流，这便于在 IGBT 处于开启状态时感测 IGBT 饱和集电极到发射极电压。当 IGBT 处于关闭状态时，D1 会屏蔽高电压。在此参考设计中，D1 在 IGBT 处于关闭状态时屏蔽最高 1200V 的电压。开关感性负载会导致 IGBT 续流二极管上出现较大的瞬时的正向电压瞬变。这些瞬变将导致 DESAT 引脚出现较大负尖峰，这将从器件中消耗大量电流。为了将此电流限制在破坏级别以下，可将一个 1 kΩ 电阻器与 DESAT 二极管串联。需要 220 pF 消隐电容器 C10，这会在电源器件由关闭改为开启时禁用 DESAT 检测。有关详细设计流程，请参阅[适用于三相逆变器的宽输入隔离式 IGBT 栅极驱动 Fly-Buck™ 电源设计指南](#)。

2.4.5 STO_FB 信号流路径

ISO7710 是一款增强型数字隔离器，用于接收输入信号 STO_FB_EN 并与 TIOS1013 (一款推挽驱动器) 协同工作，来向安全 PLC 提供反馈信号 STO_FB (逻辑高电平 = 24V)。STO_FB_EN 是或门 SN74AHC1G32 的输出信号，该器件用于接收双通道反馈信号 STO_1_FB 和 STO_2_FB。图 2-14 显示了对应的原理图。

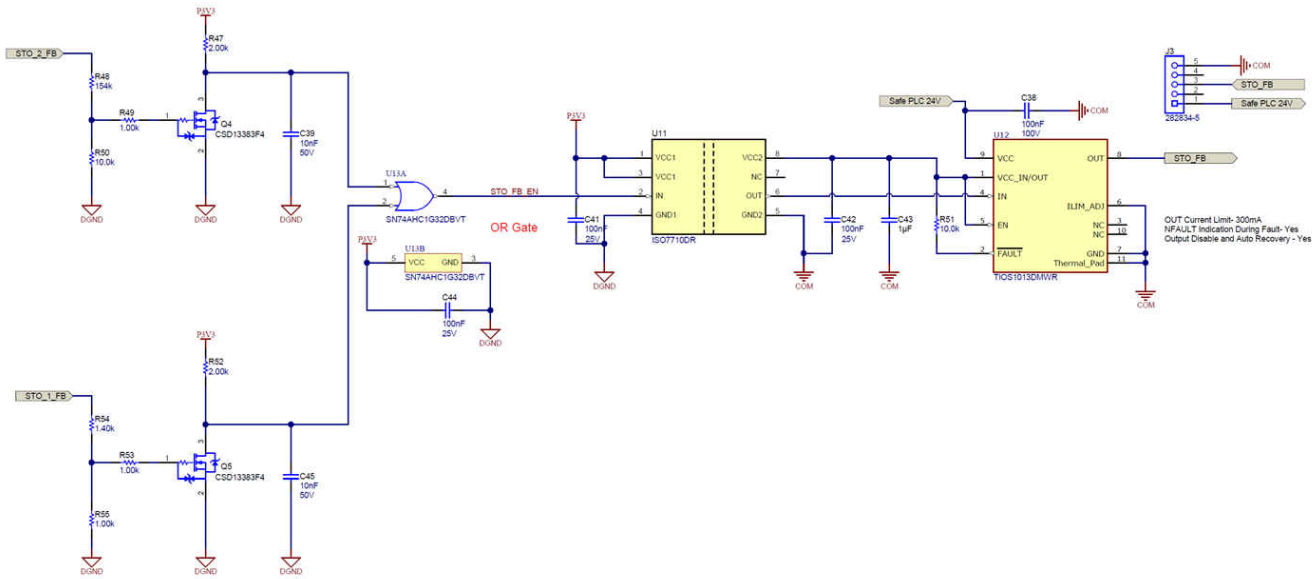


图 2-14. STO_FB 反馈监视器原理图

STO_1_FB 是负载开关 TPS22919 (控制栅极驱动器的初级侧 VCC1) 的输出，STO_1_FB 通过电阻分压网络 (R54|R55 - 1.4kΩ|1kΩ) 连接到 Q5 的栅极，以便将 STO_1_FB 的开关阈值与栅极驱动器 ISO5852S (或 ISO5452) 的最大 UVLO1 阈值电压同步。根据 FET Q5 CSD13383F4 和栅极驱动器 ISO5852S (或 ISO5452) 的数据表， $V_{GS(th)min} = 0.7V$ ， $V_{IT+(UVLO1)} = 2.25V$ ，然后用于模拟开关阈值。STO_1_FB 的逻辑 0 (关断) 为 0V 至 2V，而逻辑 1 (导通) 为 2V 至 3.9V (3.9V 是 P3V3 的最大电压)。由于存在限流电阻器 R52 (2kΩ)，导通期间 $V_{GS} = 1.37V$ 且 I_{DS} 电流为 1.6mA。

STO_2_FB 是负载开关 TPS27S100 (通过 TIDA-00199 安全电源控制栅极驱动器的次级侧 VCC2) 的输出，STO_2_FB 通过电阻分压网络 (R48|R50 - 154kΩ|10kΩ) 连接到 Q4 的栅极，以便将 STO_2_FB 的开关阈值与 TIDA-00199 设计的最大 UVLO 阈值电压同步。根据 FET Q4 CSD13383F4 数据表和 TIDA-00199 设计指南， $V_{GS(th)min} = 0.7V$ ， $V_{OFF(UVLO)} = 14V$ ，然后用于模拟开关阈值。STO_2_FB 的逻辑 0 (关断) 为 0V 至 14V，而逻辑 1 (导通) 为 14V 至 28.8V (28.8V 是 P24V 的最大电压)。由于存在限流电阻器 R47 (2kΩ)，导通期间 $V_{GS} = 1.46V$ 且 I_{DS} 电流为 1.65mA。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 入门硬件

3.1.1 PCB 概述

图 3-1 显示了修订版 E2.1 印刷电路板 (PCB) 的顶视图。

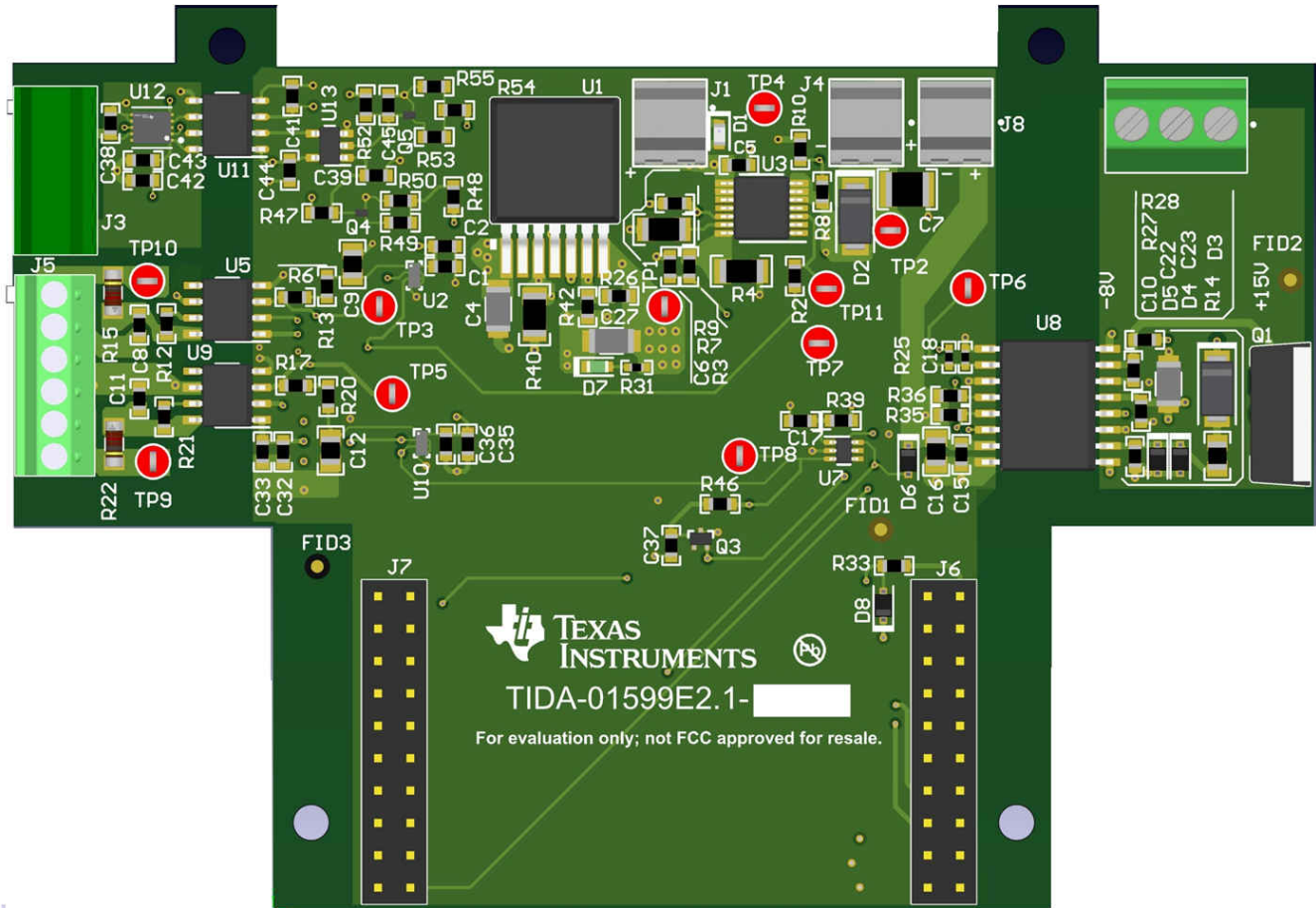


图 3-1. TIDA-01599 PCB - 顶视图

J5 是一个 6 引脚连接器，可向两个 24V STO 信号提供输入。J3 是一个五引脚连接器，用于从安全 PLC 提供 24V 电源，同时还将 STO_FB 信号反馈给 PLC。J1 是一个 24V 连接器，可向高侧负载开关供电。3.3V 电源轨是在电路板上产生的，用于向数字隔离器、与门、低侧开关和 MCU 供电。J4 和 J8 是分别从两个开关输出供应 24V 和 3.3V 电压的连接器。

J6 和 J7 是母连接器，这些连接器已留出 52mm 以连接到 C2000™ MCU LaunchPad™ 开发套件。

表 3-1 至表 3-4 列出了 TIDA-01599 参考设计中所用全部连接器的引脚分配、引脚说明以及级别。

表 3-1. 引脚分配连接器 J5 (STO)

引脚	信号	规格	注释
J5-1	STO_2	24V 用于 STO_2 输入	
J5-2	GND2	24V 输入 GND2	
J5-3	GND1	24V 输入 GND1	
J5-4	STO_1	24V 用于 STO_1 输入	
J5-5	NC		
J5-6	NC		

表 3-2. 引脚分配连接器 J3 (STO_FB)

引脚	信号	规格	注释
J3-1	安全 PLC 24V	来自安全 PLC 的 24V 电源	
J3-2	NC		
J3-3	STO_FB	具有逻辑高电平 24V 和逻辑低电平 0V 的 STO 反馈信号	
J3-4	NC		
J3-5	COM	安全 PLC 24V 的参考地	

表 3-3. 引脚分配连接器 J1、J4、J8

引脚	信号	规格	注释
J1-1	DGND	24V 输入 DGND	
J1-2	24VIN	24V 输入	
J4-1	P24V	24V 输出	STO_2 输出
J4-2	DGND	24V 输出 DGND	
J8-1	VCC	3.3V 输出	STO_1 输出
J8-2	DGND	3.3V 输出 DGND	

表 3-4. 引脚分配连接器 J6、J7 MCU 接口

引脚	信号	规格	注释
J6-1	P3V3	3.3V 输出	
J6-2	NC		
J6-3	NC		
J6-4	DGND	3.3V 和 I/O 的 DGND	
J6-5	MCU_STO2_In	用于 STO_2 通道的 ISO1211 3.3V 输出	用于 ISO1211 诊断
J6-6	Monitor_1	用于 STO_1 通道的 TPS22919 3.3V 输出	用于 TPS22919 诊断
J6-7	MCU_Diag_Ctrl_Out1	来自 SIL 1 MCU 的 3.3V 逻辑高电平脉冲	用于关闭安全开关 1 的诊断脉冲
J6-8	Monitor_2	用于 STO_2 通道的 TPS27S100 2.8V 输出	用于 TPS27S100 诊断
J6-9	MCU_Diag_Ctrl_Out2	来自 SIL 1 MCU 的 3.3V 逻辑高电平脉冲	用于关闭安全开关 2 的诊断脉冲
J6-10	NC		
J6-11	NC		
J6-12	NC		
J6-13	RDY	栅极驱动器的电源正常输出，通过上拉电阻器连接到 3.3V	两个电源都正常时高电平有效

表 3-4. 引脚分配连接器 J6、J7 MCU 接口 (continued)

引脚	信号	规格	注释
J6-14	NC		
J6-15	FLT	栅极驱动器的故障输出，通过上拉电阻器连接到 3.3V	在 DESAT 情况下低电平有效
J6-16	NC		
J6-17	RST	栅极驱动器的复位输入 (逻辑高电平 3.3V)	施加低电平脉冲来复位故障锁存
J6-18	NC		
J6-19	CS	TPS27S100 的电流监视输出，连接到 MCU ADC 输入端，电压范围为 0V 至 3.3V	
J6-20	NC		
J7-1	PWW_In	来自 MCU 的 PWM 脉冲 (逻辑低电平 0V ，逻辑高电平 3.3V)	
J7-2	DGND	I/O 的 DGND	
J7-3	NC		
J7-4	NC		
J7-5	NC		
J7-6	NC		
J7-7	NC		
J7-8	NC		
J7-9	NC		
J7-10	NC		
J7-11	NC		
J7-12	NC		
J7-13	MCU_STO1_In	用于 STO_1 通道的 ISO1211 3.3V 输出	用于 ISO1211 诊断
J7-14	NC		
J7-15	DIAG_EN	TPS27S100 用于诊断功能的使能和禁用引脚	使能引脚永久连接到 3.3V，以实现持续诊断监控，同时还将信号发送回诊断 MCU (SIL 1)。
J7-16	NC		
J7-17	NC		
J7-18	NC		
J7-19	NC		
J7-20	NC		

3.2 测试和结果

备注

本章中的测试结果均基于修订版 E1.0 电路板进行测试。表 3-5 列出了从修订版 E1.0 到修订版 E2.1 的所有设计变更。

表 3-5. 修订版 E2.1 的设计变更日志

编号	修订版本	文档参考	变更说明
1	E2.1	原理图和 BOM	将 U5 (双通道隔离器 ISO1212) 更改为 2 个单通道隔离器 U5 和 U9 (ISO1211), 以实现 1 (HFT=1) 硬件容错。
2	E2.1	原理图和 BOM	移除隔离器输入端的 U4、U6 (TVS3300), 因为具有 $R_{sense}=562W$ 和 $R_{th}=2.5kW$ 的 ISO1211 支持 $\pm 1kV$ 浪涌电压。请参阅 ISO1211 数据表中的表 3。
3	E2.1	原理图和 BOM	为 STO 1 输出 VCC (栅极驱动器逻辑电源) 添加另一个钳位电路 (R46、C37、Q3)。 这可防止 VCC 电源的反向偏置流过 CMOS 输入栅极驱动器 ISO5852S (或 ISO5452), 以防 PWM 信号仍处于高电平有效 (3V3) 状态。
4	E2.1	原理图和 BOM	添加隔离式 24 STO_FB 输出电路, 以指示驱动状态 (安全状态或正常运行)。可在必要时用于将驱动器的状态反馈给安全 PLC 以进行额外的诊断。
5	E2.1	原理图和 BOM	将所有设计状态为“过时”或“不用于新设计”的电容器 (MLCC) 更改为状态为“正在供货”的器件。
6	E2.1	原理图和 BOM	将设计状态为“过时”的指示 LED D7 更改为状态为“正在供货”的器件。根据新的 D7 额定电流, 将 R31 从 50Ω 更改为 200Ω 。
7	E2.1	原理图和 BOM	负载开关 U7 从 TPS22860 更改为 TPS22919, 以避免输入引脚开路故障: <ul style="list-style-type: none"> • TPS22860 输入开路 高阻态 --> 将导致输出出现不确定状态。 • TPS22919 输入开路 高阻态 --> 不会将电源传输至 OUT。
8	E2.1	原理图和 BOM	将单个 U2 (4 通道逻辑门 SN74HC7001DT) 更改为两个独立的逻辑门 U2 和 U10 (SN74LVC2G132YZPR) 以实现 HFT=1。
9	E2.1	原理图和 BOM	将 R13 ($1k\Omega$) 与 R6 和 R13 (2 个 499Ω) 分开。 将 R20 ($1k\Omega$) 与 R17 和 R20 (2 个 499Ω) 分开。 为了摆脱电阻器的短路或更改值故障模式, 而电阻器将会旁路逻辑门的滤波器。
10	E2.1	原理图和 BOM	将 J2 从 OST ED555/3DS 更改为 PHX 1751251。 螺钉孔更大, 安装电缆更方便。
11	E2.1	原理图	在 STO_1 和 STO_2 电路周围添加线条并排除电源。针对 PSU 添加说明, 指出 PSU 不是 TUEV 概览回顾的一部分, 并且需要是受保护的电源。(请参阅 TIDA-01599_STO_Concept_FMEA_1v6.docx)
12	E2.1	原理图	向原理图中添加电源轨要求 (请参阅 TIDA-01599_STO_Concept_FMEA_1v6.docx)
13	E2.1	原理图和 BOM	将 R15、R22 更改为防脉冲型 MELF 并将 C8、C11 额定电压更改为 100V
14	E2.1	布局	根据上述修改更改布局和电路板尺寸。
15	E2.1	布局	交换电源层 (中间层 2) 和接底层 (中间层 1), 以便为 TOP 层上的高速信号提供正确的接地回路。

3.2.1 逻辑高电平和逻辑低电平 STO 阈值

图 3-2、图 3-3 和图 3-4 显示了 ISO1212 的输入逻辑高电平和逻辑低电平阈值。请注意, V_{IH} (最小值) 是 $14.20V$, V_{IL} (最大值) 是 $11.20V$, 这些值与节 2.4.1 中计算得出的典型值具有相关性。

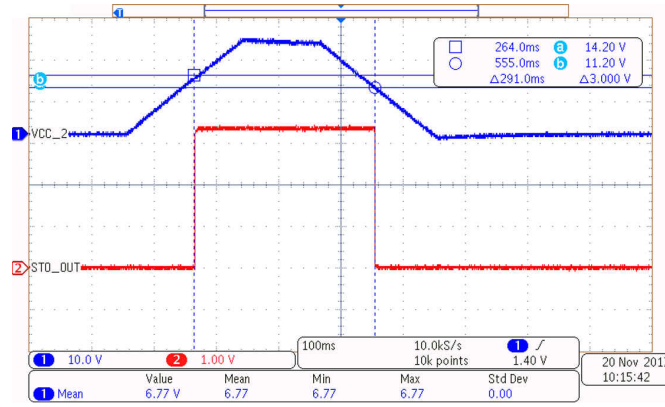


图 3-2. 数字隔离器的逻辑阈值

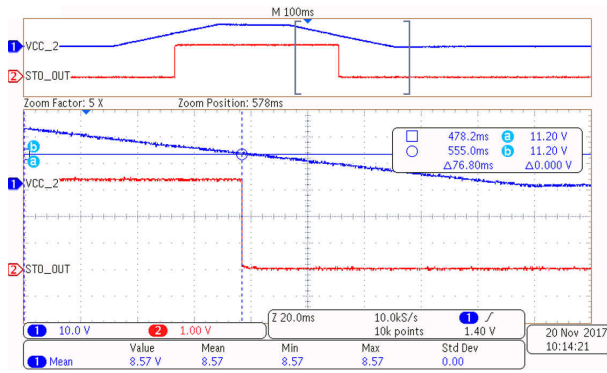


图 3-3. 数字隔离器的逻辑阈值一下降沿

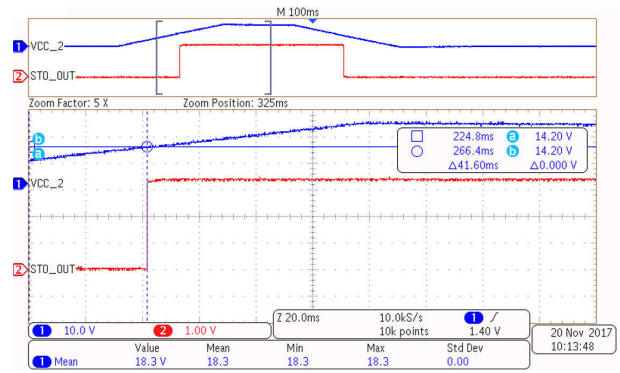


图 3-4. 数字隔离器的逻辑阈值一上升沿

3.2.2 STO1 信号验证

3.2.2.1 STO1 传播到栅极驱动器的 VCC1

STO1 信号在 15ms 时间段内变为低电平。如图 3-5 和图 3-6 所示，从 STO 信号变为低电平到激活 RDY 引脚，测得的响应时间是 2.7 ms。响应时间是负载开关输出端电容 C16 的一项功能。通过更改电容值，可更改响应时间。当 VCC1 低于 UVLO 阈值时，RDY 引脚将被激活。ISO5852S 的 UVLO+ 阈值是 2.25V。

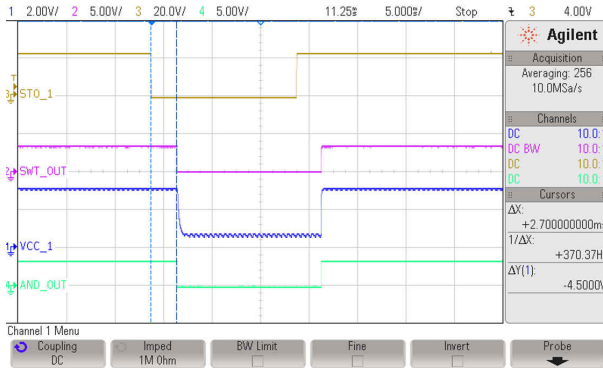


图 3-5. STO1 传播到栅极驱动器的 VCC1

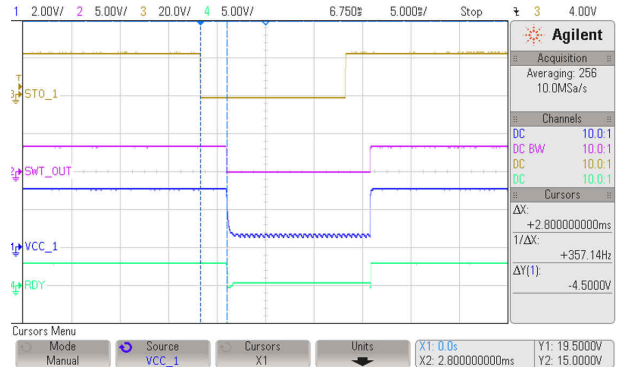


图 3-6. 当 VCC_1 关闭时 RDY 信号的指示 (低电平有效)

3.2.2.2 1ms STO 脉冲抑制

图 3-7 和图 3-8 显示了数字隔离器输出端的低通滤波器会抑制 1 ms STO 低电平脉冲。

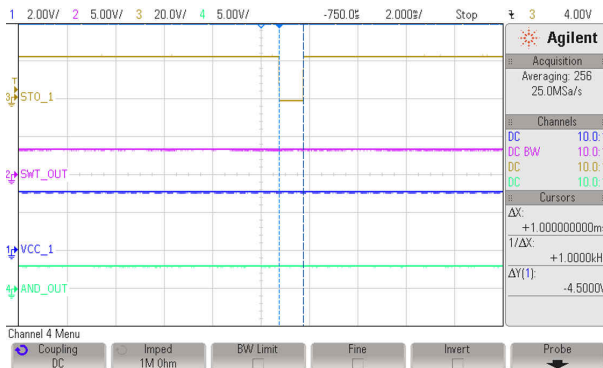


图 3-7. STO1 信号路径上被 LPF 抑制的 1 ms 脉冲

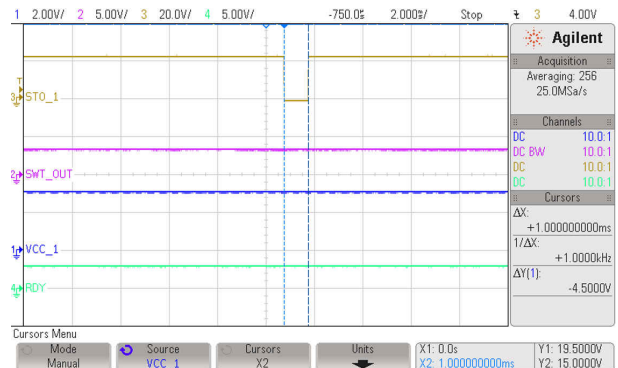


图 3-8. STO1 信号路径上被 LPF 抑制的 1 ms 脉冲—RDY 引脚保持为高电平

3.2.2.3 MCU 接口的诊断脉冲

MCU 定期发送 100 μ s 低电平脉冲。在此时间段内，VCC1 不会远低于栅极驱动器的 UVLO。0.47 μ F 的电容器可确保 VCC_1 不会降至 UVLO 阈值以下。在 100 μ s STO 脉冲期间，使用较高的电容值可最大限度地降低 VCC1 中的压降。图 3-9 显示了测试结果。

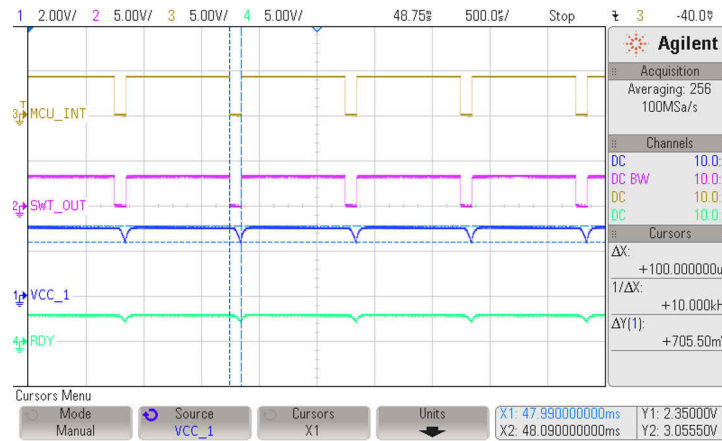


图 3-9. MCU 接口的诊断脉冲对 STO1 信号路径的影响

3.2.3 STO2 信号验证

3.2.3.1 STO2 传播到栅极驱动器的 VCC2

STO2 信号在 15 ms 时间段内变为低电平。如图 3-10 和图 3-11 所示，从 STO 信号变为低电平到激活 RDY 引脚，测得的响应时间是 7.4 ms。当 VCC2 低于 UVLO 阈值时，RDY 引脚将被激活。ISO5852S 的 UVLO+ 阈值是 12V。响应时间是智能开关输出端电容 C7 的一项功能。通过更改电容值，可更改响应时间。

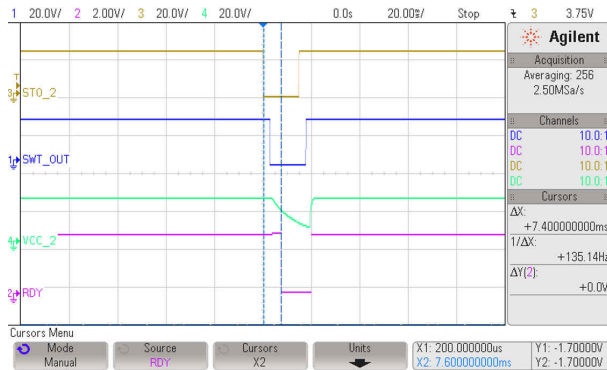


图 3-10. 当 VCC_2 关闭时 RDY 信号的指示 (低电平有效)

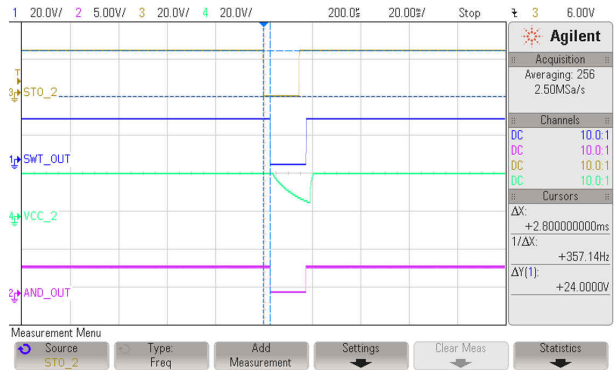


图 3-11. STO2 传播到栅极驱动器的 VCC2

3.2.3.2 1 ms 脉冲抑制

图 3-12 和图 3-13 显示了数字隔离器输出端的低通滤波器会抑制 1 ms STO 低电平脉冲。

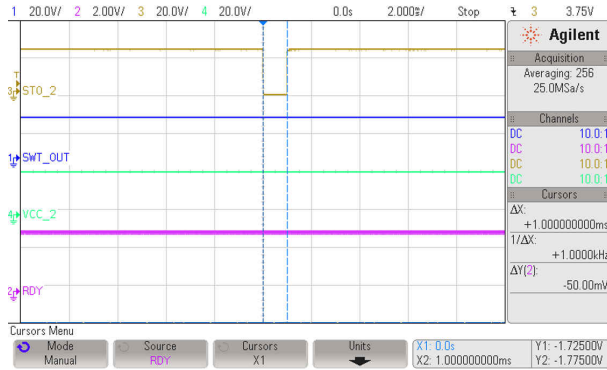


图 3-12. STO2 信号路径上被 LPF 抑制的 1 ms 脉冲—RDY 引脚保持为高电平

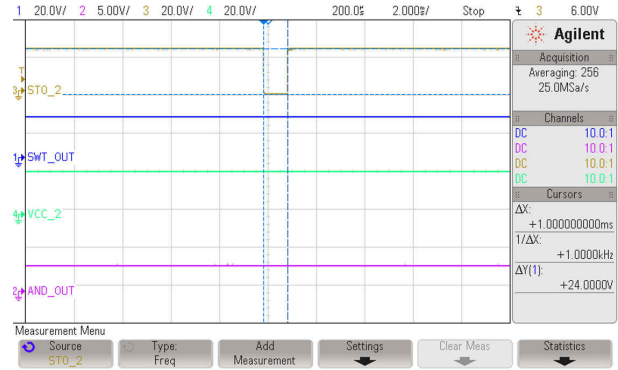


图 3-13. STO2 信号路径上被 LPF 抑制的 1 ms 脉冲

3.2.3.3 MCU 的诊断脉冲

MCU 定期发送 100 μs 低电平脉冲。在此时间段内，VCC1 不会远低于栅极驱动器的 UVLO。这通过在开关输出端使用 10 μF 的电容器 C7 进行处理。图 3-14 显示了测试结果。在 100 μs STO 脉冲期间，使用较高的电容值可最大限度降低 VCC2 中的压降。

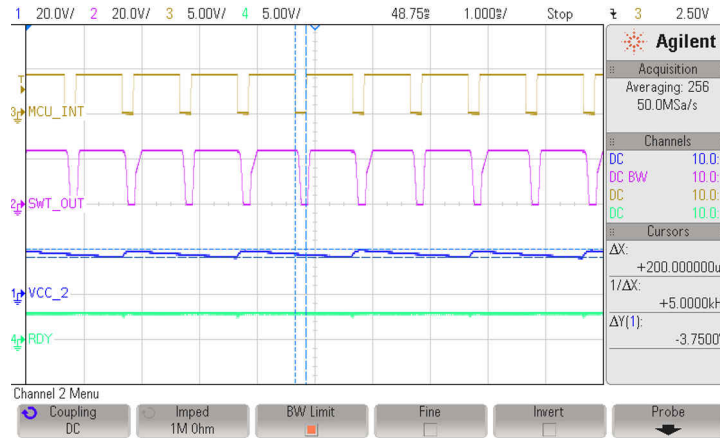


图 3-14. MCU 接口的诊断脉冲对 STO2 信号路径的影响

3.2.3.4 浪涌电流测量

使用 TPS27S00 器件设置电流限制。如节 2.4.3 中所述，电流限制设置为 1A。出现峰值期间，电流被限制为 1A（根据方程式 8 计算得出）。

$$I_{OUT} = \frac{V_{(IMON)} \times K_{(IMON)}}{R4} = \frac{3.3 \text{ V} \times 500}{1.65 \text{ K}} = 1 \text{ A} \quad (8)$$

导通状态期间开关中的电流可通过方程式 9 计算得出。

$$I_{OUT} = \frac{V_{(IMON)} \times K_{(IMON)}}{R4} = \frac{0.3 \text{ V} \times 500}{1.65 \text{ K}} = 90 \text{ mA} \quad (9)$$

此计算得出的 I_{OUT} 值与用万用表测得的值完全匹配 (参见图 3-15 和图 3-16) 。

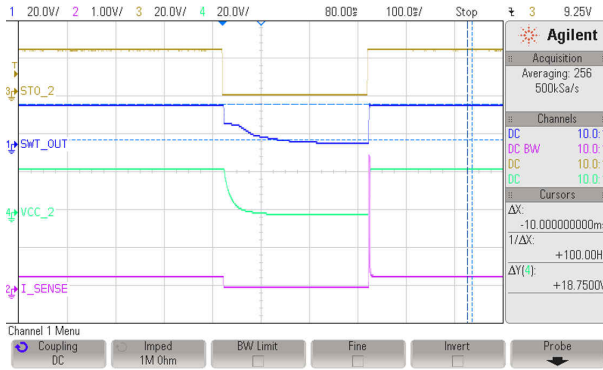


图 3-15. TPS27S100 的浪涌电流测量

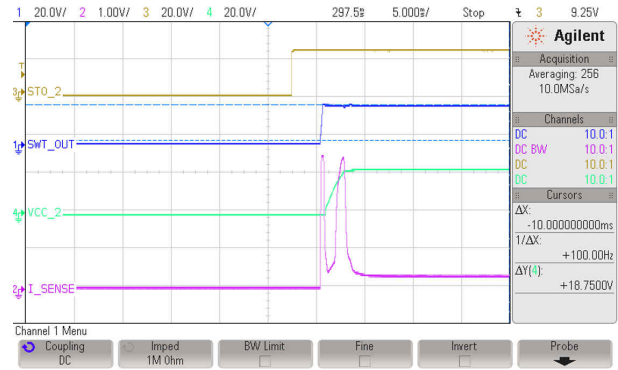


图 3-16. TPS27S100 的浪涌电流测量放大图

由于 TIDA-00199 电路板的输入和输出电容，图 3-15 和图 3-16 在转换状态时显示的两个峰值与电流限制相对应。图 3-17 中的路径 1 和路径 2 显示了在 TIDA-00199 电路板上充电的两个电容器。

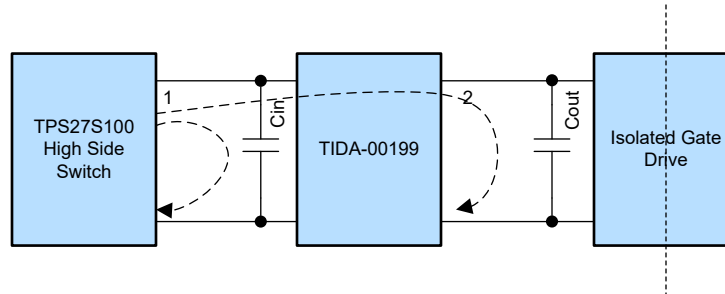


图 3-17. TIDA-00199 的输入和输出电容器的充电

3.2.4 基于开关的 3.3V 电压轨

图 3-18 和图 3-19 显示了负载电流为 13 mA 时 3.3V 电源轨上的纹波电压。13 mA 时的纹波电压峰-峰值为 27.75 mV。



图 3-18. 负载电流为 13 mA 时的纹波电压

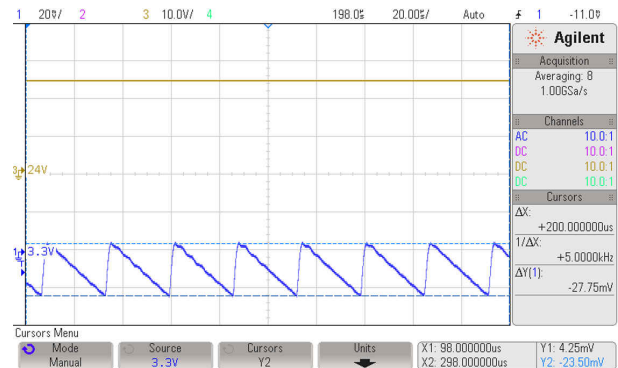


图 3-19. 负载电流为 13 mA 时的纹波电压放大图

图 3-20 和图 3-21 显示了负载电流为 40 mA 时 3.3V 电源轨上的纹波电压。40 mA 时的纹波电压峰-峰值为 33 mV。

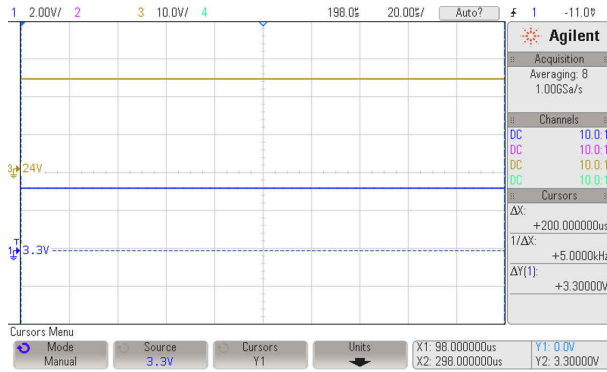


图 3-20. 负载电流为 40 mA 时的纹波电压

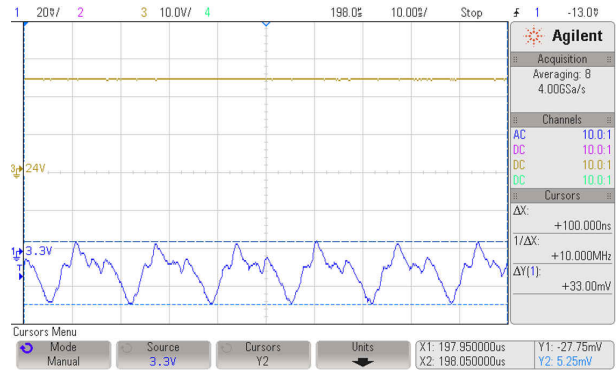


图 3-21. 负载电流为 40 mA 时的纹波电压放大图

3.2.5 60V 输入电压和反极性保护

图 3-22 和图 3-23 显示，当在数字隔离器输入端应用 60V 正负电压时，输出不受影响。

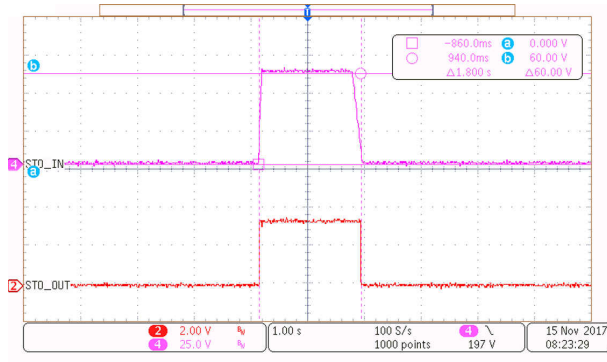


图 3-22. 60V 输入电压保护

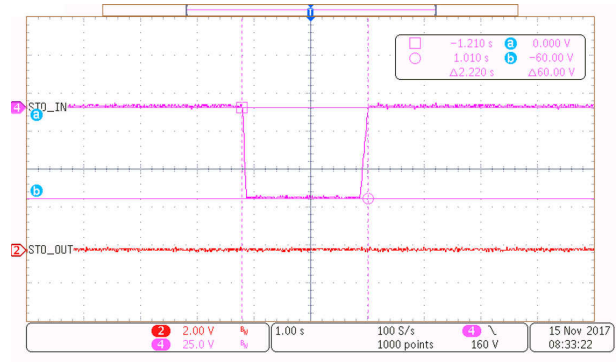


图 3-23. 60V 反极性保护

3.2.6 跳闸区域功能验证

图 3-24 显示了跳闸功能的实现过程。随着 STO 变为低电平，跳闸区域值开始下降。在 1.52 ms 时间段内，到栅极驱动器的 PWM 输入（以及到开关器件栅极的输出）将被终止。

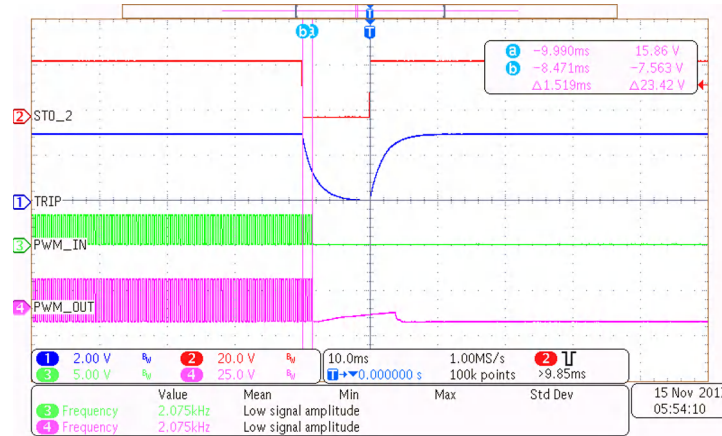


图 3-24. 通过 STO2 验证跳闸区域功能

图 3-25 显示了被设计抑制的 1 ms STO 低电平脉冲。

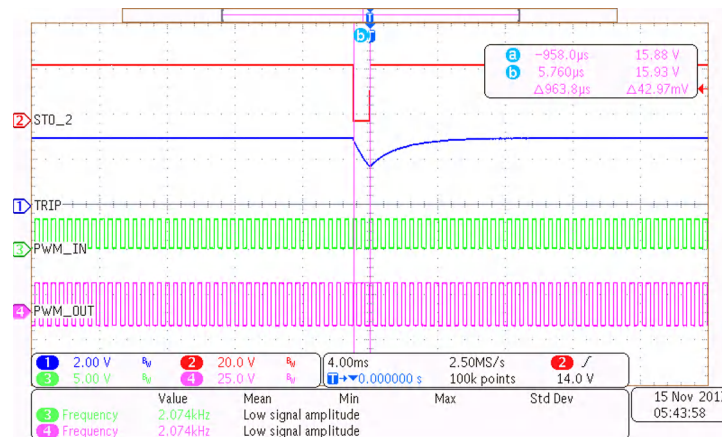


图 3-25. 抑制的影响：跳闸时的 1 ms 脉冲

4 设计文件

4.1 原理图

若要下载原理图，请参阅 [TIDA-01599](#) 中的设计文件。

4.2 物料清单

若要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-01599](#) 中的设计文件。

4.3 板层图

若要下载板层图，请参阅 [TIDA-01599](#) 中的设计文件。

4.4 Altium 项目

若要下载 Altium 工程文件，请参阅 [TIDA-01599](#) 中的设计文件。

4.5 Gerber 文件

若要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-01599](#) 中的设计文件。

4.6 装配图

若要下载装配图，请参阅 [TIDA-01599](#) 中的设计文件。

5 相关文档

1. 德州仪器 (TI)，TIDA-00199 [用于三相逆变器的宽输入隔离式 IGBT 栅极驱动 Fly-Buck™ 电源设计指南](#)
2. 德州仪器 (TI)，TIDA-00195 [适用于 200V 交流伺服驱动器的三相 PWM 高频 GaN 逆变器参考设计设计指南](#)
3. IEC 61800-5-2，可调速电力驱动系统 - 第 5-2 部分：安全要求 - 功能
4. IEC 61508，Functional safety of electrical | electronic | programmable electronic safety-related systems
5. ISO13849-1 | 2，Safety of machinery - Safety-related parts of control systems - Part 1: General principles for design, - Part 2: Validation
6. 德州仪器 (TI)，TIDA-01599 [STO 概念 TUEV 报告 TF97657T Rev.1.1](#)
7. 德州仪器 (TI)，[概述 STO 概念 TIDA-01599 功能安全信息](#)

5.1 商标

TI E2E™, LaunchPad™, Fly-Buck™, and C2000™ are trademarks of Texas Instruments.
所有商标均为其各自所有者的财产。

6 关于作者

AISHWARYA BHATNAGAR 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，负责为工业系统内的电机驱动部分开发参考设计解决方案。Aishwarya 拥有阿拉哈巴德尼赫鲁科技大学电子与通信工程专业工学学士学位。

NAVANEETH KUMAR 是德州仪器 (TI) 工业系统电机驱动器团队的系统架构师，负责为工业驱动器指定并开发参考设计。

MARTIN STAEBLER 是德州仪器 (TI) 工业系统电机驱动器团队的系统架构师，负责为工业驱动器指定并开发参考设计。

CHEN GAO 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，负责为工业系统内的电机驱动部分开发参考设计解决方案。

7 鸣谢

作者希望在此感谢 **NELSON ALEXANDER** 在 TIDA-01599 设计的构思、测试和文档编制阶段作出的出色贡献。

8 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 A (April 2022) to Revision B (November 2022)	Page
• 删除了 节 2.4.5 中的两个图像.....	21

Changes from Revision * (December 2017) to Revision A (April 2022)	Page
• 更改了文档标题。.....	1
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式。.....	1
• 根据版本 A 的设计更新了所有图片。.....	1
• 针对版本 A 更新了 说明 、 资源 、 特性 和 应用 部分。.....	1
• 更新了 关键系统规格 表。.....	3
• 针对版本 A 更新了 方框图 部分。.....	4
• 针对版本 A 添加了 设计注意事项 部分。.....	5
• 针对版本 A 将 表 2-1 添加至 表 3-4 。.....	5
• 针对版本 A 更新了 主要产品 部分。.....	12
• 针对版本 A 更新了 PCB 概述 部分。.....	22
• 针对版本 A 更新了 板层图 中的 PCB 布局建议。.....	33
• 针对版本 A 在 相关文档 部分添加了一些参考文献。.....	33

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司