

### 说明

本参考设计展示了如何使用固态继电器实现过零开关 (ZCS)。本参考设计采用 TPSI3050-Q1 隔离式开关驱动器。TPSI3050-Q1 器件集成了层压变压器以实现隔离，同时将信号和电源传输到次级侧。这样就无需使用任何隔离偏置电源。此外，TPSI3050-Q1 器件可以为位于高压 (HV) 侧的外部电路提供辅助电流 ( $I_{AUX}$ )。过零开关是在保持低压 (LV) 和 HV 侧之间的信号隔离的同时完成的。本参考设计通过 110V<sub>RMS</sub>、60 Hz 交流电源实现了 12V、200 us 延迟 ZCS。

### 资源

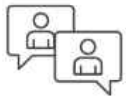
<a href="#">TIDA-050058</a>	设计文件夹
<a href="#">TPSI3050-Q1</a>	产品文件夹
<a href="#">AMC23C10</a>	产品文件夹
<a href="#">SN74HCS72-Q1</a>	产品文件夹
<a href="#">TMUX1219</a>	产品文件夹

### 特性

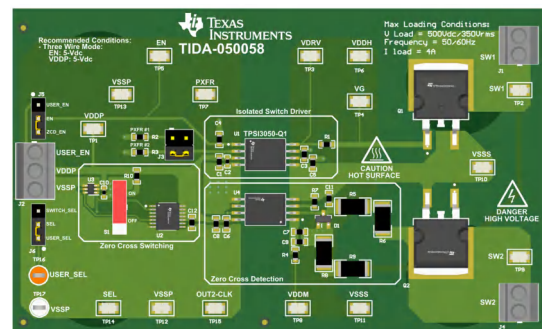
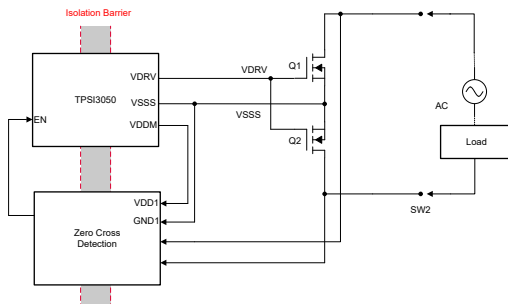
- 无需隔离式次级电源
- 5kV<sub>RMS</sub> 增强型隔离
- 500V<sub>DC</sub>/350V<sub>RMS</sub> 负载，最大 4A
- 零电压开关 (ZVS)
- 固态继电器 (SSR) 解决方案
- < 4 us 即时负载断开连接

### 应用

- [固态继电器 \(SSR\)](#)
- [电网基础设施](#)
- [楼宇自动化](#)
- [工厂自动化和控制](#)
- [电器](#)



咨询我们的 TI E2E™ 支持专家



## 1 系统说明

过零检测允许电路检测负载交流波形何时达到零电压点。当交流电源处于零伏时导通开关可提高系统效率和可靠性。如果在电源处于峰值电压时打开交流电源，则可能会导致高频开关噪声、高浪涌电流尖峰以及对系统的危险应力。本参考设计采用使用 TPSI3050-Q1 隔离式开关驱动器和背对背 N 沟道 MOSFET 实现的 SSR。TPSI3050-Q1 会产生 10V 的电源轨来驱动功率 FET 的栅极，并产生 5V 的中间电源轨来为过零开关逻辑所需的 HV 侧电路供电。TPSI3050-Q1 为汽车应用提供 5kV<sub>RMS</sub> 增强型隔离和 AEC-Q100 认证，而 TPSI3050 为工业应用提供 3kV<sub>RMS</sub> 基本隔离。

图 1-1 展示了带有和不带有过零检测功能的设计的操作。如果过零检测未实现，当接收到使能信号时，负载立即连接到源。负载可以在任何电压电平下打开。最糟糕的情况是电源处于最大电压条件下并且负载已连接。产生的浪涌电流会损坏敏感电路，并且 EMI 开关噪声会在整个系统中传播。如果使用机械继电器，在峰值电压下进行切换会导致电弧或焊接，从而损坏继电器以及下游系统。使用过零开关 SSR 可以克服这些挑战。本参考设计使用 AMC23C10 隔离比较器检测过零电压并向低压侧发送信号。信号在比较器的 OUT2 输出端由高变为低。然后由 SN74HCS72 触发器检测下降沿，并锁存信号，使 TPSI3050-Q1 保持导通。此外，过零开关逻辑使用开关和多路复用器为用户提供随时断开负载的能力。

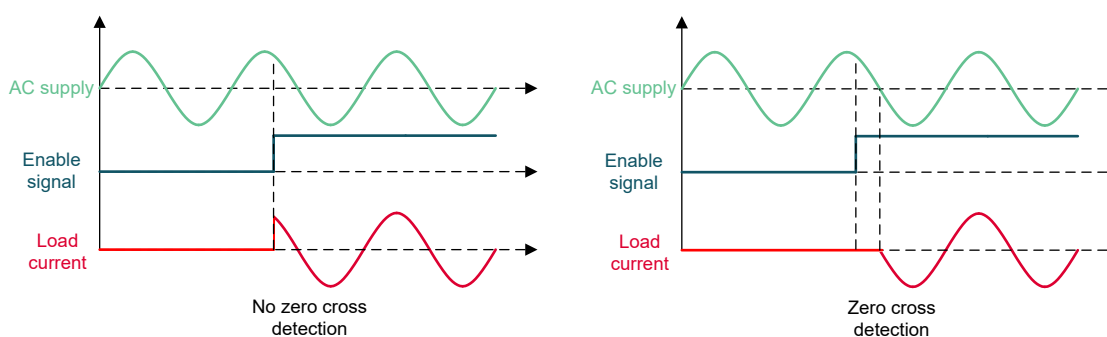


图 1-1. 过零开关

### 1.1 系统设计原理

以下部分提供了参考设计和结果的完整摘要。该参考设计使用四个主要元件 (TPSI3050-Q1、AMC23C10、SN74HCS72、TMUX1219) 来实现过零开关。图 1-2 展示了参考设计的整体系统行为。

- 交流电源是负载的交流电源。
- OUT2 是隔离比较器 (AMC23C10) 的输出。
- SEL 是多路复用器 (TMUX1219) 的输出选择信号。
- EN 是隔离式开关驱动器 (TPSI3050-Q1) 的使能信号。
- ILOAD 是通过负载的负载电流。

当交流电源连接到背对背 MOSFET 时，反向并联二极管 D1 会产生正向偏置电压降，AMC23C10 使用该电压降来切换 OUT2。OUT2 在交流电源的每个过零处进行切换。OUT2 信号作为时钟信号提供给触发器 SN74HCS72。SN74HCS72 是 D 型负沿触发器，只在时钟信号的下降沿改变输出 Q，在本例中为 OUT2。SEL 信号控制多路复用器的输出。当 SEL 为低电平时，EN 保持低电平以保持负载断开。当 SEL 变为高电平时，触发器等待下一个下降沿并将输出 Q 变为高电平。多路复用器 (EN) 的输出切换为高电平并连接负载。当 SEL 信号切换为低电平时，负载立即断开。

本参考设计使用 110V<sub>RMS</sub>、60 Hz 交流电源和 2 k $\Omega$  电阻负载进行了测试。该设计在 12V 时开启，从零电压交叉点到连接负载时的传播延迟 ( $t_2$ ) 约为 200 us。当 SEL 切换为高电平时，负载不会立即连接，系统会等待产生 OUT2 下降沿的过零。从 SEL 到负载连接的等待时间可以用 ( $t_1+t_2$ ) 来描述。最大等待时间源于 60 Hz 电源的完整周期或  $t_1 = 16.67$  ms 加上传播延迟  $t_2 = 200$  us。本参考设计采用立即断开负载功能。当 SEL 切换为低电平时，负载立即断开。更多相关信息，请访问[节 3.3](#)。

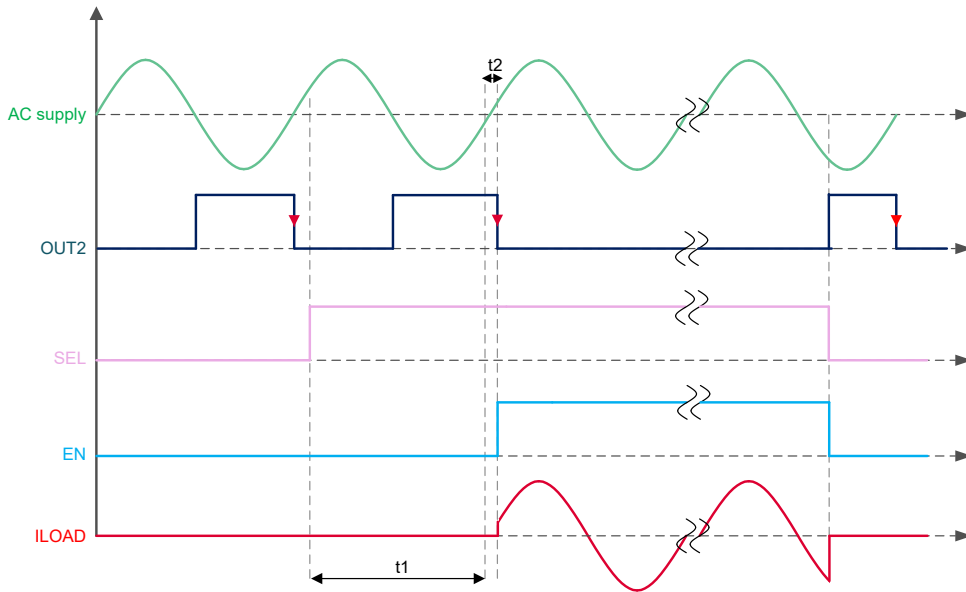
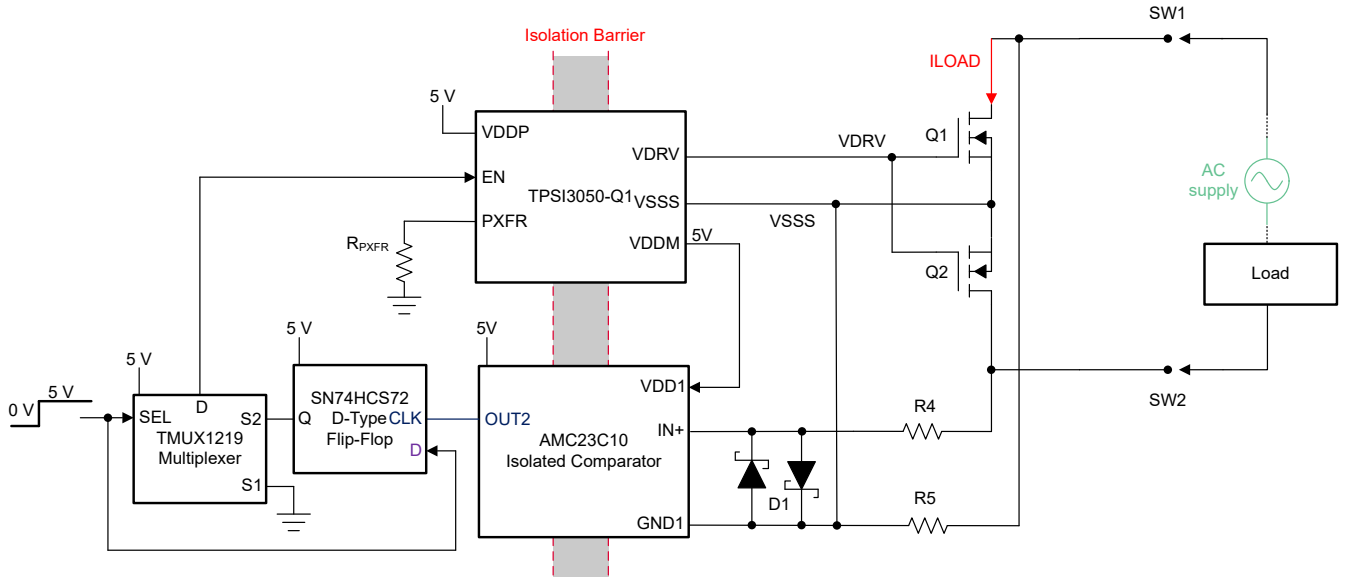


图 1-2. 过零开关操作

## 2 系统概述

### 2.1 方框图

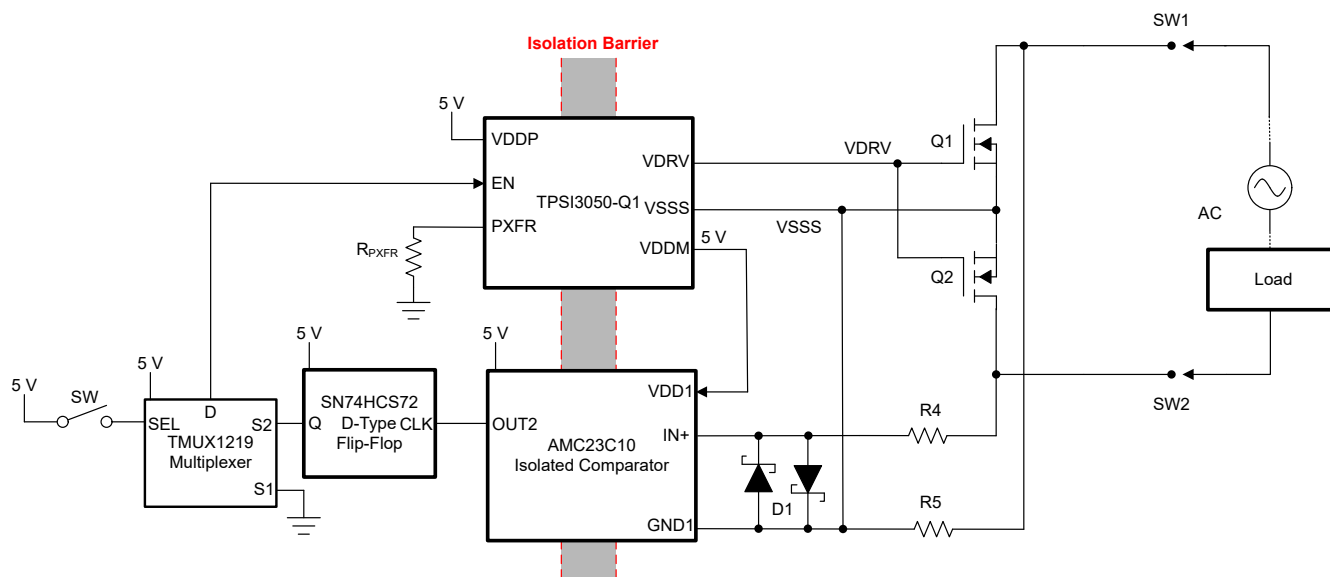


图 2-1. 方框图

### 2.2 重点产品

参考设计采用 TPSI3050-Q1、AMC23C10、SN74HCS72-Q1 和 TMUX1219。

### 2.3 设计注意事项

#### 2.3.1 TPSI3050-Q1

TPSI3050-Q1 是一款完全集成的隔离式开关驱动器，与外部电源开关结合使用时，可构成完整的隔离式固态继电器 (SSR) 解决方案。当标称栅极驱动电压为 10V、峰值拉电流和灌电流为 1.5/3.0A 时，可以选择多种外部电源开关来满足各种应用。TPSI3050-Q1 可通过初级侧电源自行产生次级偏置电源，因此无需隔离式次级偏置电源。而且，TPSI3050-Q1 可以有选择性地向外围配套电路供电，以满足不同的应用需求。在三线模式下，3V 至 5.5V 的主电源由外部提供，开关通过单独的使能控制。

TPSI3050-Q1 特性：

- 可调节功率传输
- 集成式 10V 栅极电源
- 为辅助电路提供高达 50 mW 的电源 ( $I_{AUX}$ )

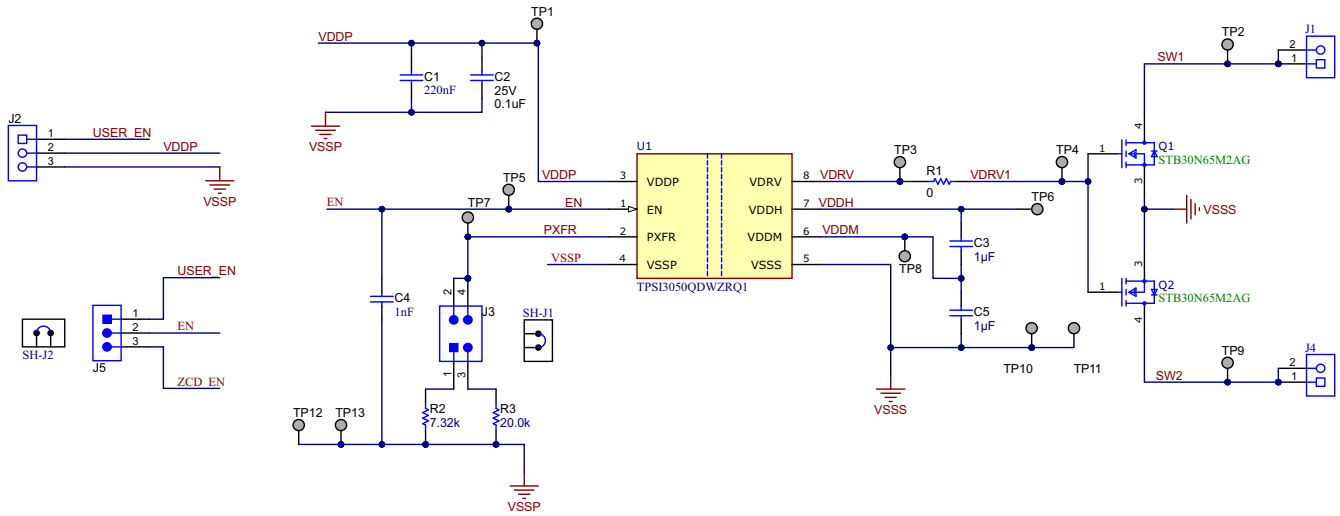


图 2-2. 固态继电器电路

对于初级侧，TPSI3050-Q1 设置为三线模式配置，以实现最高的可用功率传输。在 PXFR 引脚中使用具有 1% 容差的 20 kΩ 电阻器可提供最高的可用功率传输，并支持高达 50 mW 的  $I_{AUX}$ 。建议将一个 1 uF 与一个 0.1 uF 的低 ESR 陶瓷电容并联到 VDDP。

对于次级侧，需要正确选择  $C_{DIV1}$  (C3) 和  $C_{DIV2}$  (C4) 电容来驱动背对背 MOSFET。如果  $C_{DIV1}$  和  $C_{DIV2}$  太小，则 VDDH 中的压降将触发欠压锁定 (UVLO) 并禁用驱动器。以下两个公式可用于计算适当的电容值。

$$C_{DIV1} = \left( \frac{n+1}{n} \right) \times \frac{Q_{LOAD}}{\Delta V}, \quad n \geq 1.0 \quad (1)$$

$$C_{DIV2} = n \times C_{DIV1}, \quad n \geq 1.0 \quad (2)$$

- n 是大于或等于 1.0 的实数。
- $C_{DIV1}$  是从 VDDH 到 VDDM 的外部电容。
- $C_{DIV2}$  是从 VDDM 到 VSSS 的外部电容。
- $Q_{LOAD}$  是从 VDRV 到 VSSS 的负载总电荷。
- $\Delta V$  是切换负载时 VDDH 上的压降。

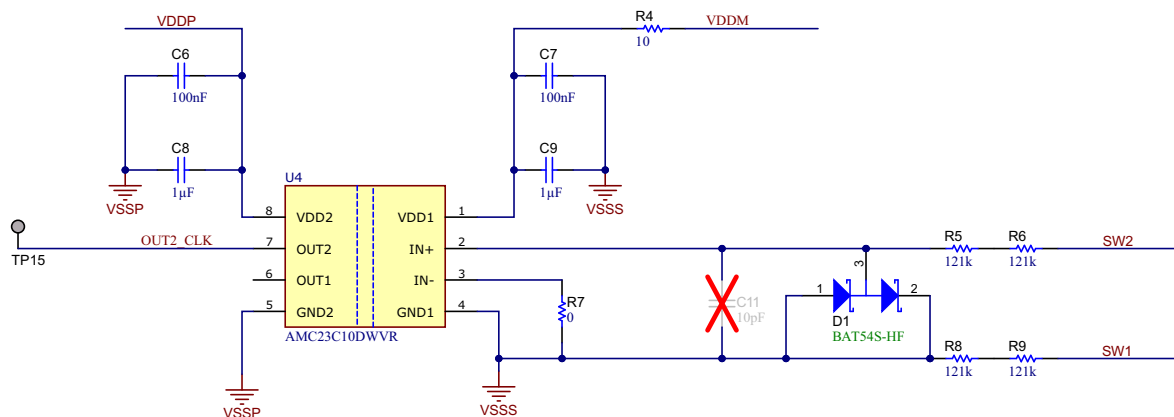
为本设计选择的每个 MOSFET 的栅极电荷 ( $Q_G$ ) 均为 31 nC。该设计使用背对背 MOSFET，因此总  $Q_G$  为 62 nC。如果  $C_{DIV1} = C_{DIV2} = C_{DIV}$ ，则必须选择电容高于 124 nF 的  $C_{DIV}$ ，以确保 VDDH 压降小于 1V。使用此 [Excel 计算器](#) 计算电容和电源传输选择。本设计选择了一个 1 uF 电容器，从而使 VDDH 压降为 0.124V。

### 2.3.2 AMC23C10

AMC23C10 是一款响应时间短的精密隔离式比较器，专门设计用于过零检测，可检测必须与低压电路实现电隔离的高压信号。开漏和推挽输出与输入电路由抗电磁干扰性能极强的隔离栅隔开。该隔离栅经认证可提供高达 5kV<sub>RMS</sub> 的增强型电隔离，符合 UL1577 标准，并且可支持最高 1kV<sub>PK</sub> 的工作电压。该器件提供一个开漏输出和一个推挽输出，传播延迟不到 300 ns。集成 LDO 在高压侧支持 3V 至 27V 的工作电压范围，因此该比较器能够采用栅极驱动器电源供电。低压侧工作电压范围为 2.7V 至 5.5V。

AMC23C10 的特性：

- 高侧电源具有宽电压范围：3V 至 27V
- 低侧电源电压范围：2.7V 至 5.5V
- 跳变阈值误差：±6 mV (最大值)
- 传播延迟：290 ns (典型值)
- 高 CMTI：100 kV/μs (最小值)
- 开漏和推挽输出


**图 2-3. 过零检测电路**

对于 VDD1 和 VDD2，建议添加一个与低 ESR、0.1 uF 陶瓷电容器并联的 1 uF 电容器。TPSI3050-Q1 通过具有 5V 电压轨的 VDDM 引脚在 HV 侧为 AMC23C10 供电。TPSI3050-Q1 的这一特性降低了系统复杂性和成本，并减少了电路板空间。

图 2-3 展示了 IN- 输入接地以有效比较反向并联二极管 D1 上的电压摆幅。输入 IN+ 通过 R4、R5、R7 和 R8 连接到交流电源。在选择这些电阻器时，一定要注意额定电压、功耗和开关延迟。电阻器必须能够承受高压交流电源。建议使用串联电阻以满足电压规格。本参考设计使用两个电阻器尺寸 (2010)，额定电压为 400V DC。务必注意在电阻器上的功耗和零电压检测精度之间进行权衡。电源开关和电阻器的寄生电容会因零电压检测而产生 RC 延迟。这种延迟会影响发生过零开关的电压。减小电阻值会减少延迟，并且负载连接到接近零伏的源极。

在此设计中，使用 242 kΩ 的电阻来偏置二极管并实现过零检测。交流电源是 110VAC 信号，频率为 60 Hz。该设计在 10.4V 时以 180.8 μs 延迟连接负载。此延迟主要由 (R4+R5) 的 RC 常数和功率 FET 的输出电容决定，而不是隔离比较器、低侧逻辑电路或 TPSI3050-Q1 的启用延迟。图 3-3 展示了开关操作的详细信息。以下公式展示了所选电阻器的峰值和平均功耗的计算方式。R 值是串联电阻之和  $R = (R4+R5) = (R7+R8)$ 。

$$I_{PK} = \frac{V_{PK}}{R} = \frac{110 V_{RMS} \times \sqrt{2}}{242 k\Omega} = 0.64 \text{ mA} \quad (3)$$

$$P_{PK} = \frac{(V_{RMS} \times \sqrt{2})^2}{R} = \frac{(110 V_{RMS} \times \sqrt{2})^2}{242 k\Omega} = 100 \text{ mW} \quad (4)$$

$$P_{AVG} = \frac{V_{RMS}^2}{R} = 50 \text{ mW} \quad (5)$$

选择串联二极管时，压降必须高于 AMC23C10 的标称开关阈值电压。AMC23C10 需要高于其标称开关阈值 +/-12.5 mV 的电压来检测有效输入。为本参考设计选择的二极管是 BAT54S-HF。该二极管能够在非常低的电流电平下提供必要的压降。图 2-4 展示了 BAT54S-HF 的正向压降特性。电容器 C11 有助于过滤来自交流电源的高频噪声，但是，C11 也可以增加传播延迟以检测过零电压。在此设计中，未填充 C11，目的是保持较低的传播延迟。

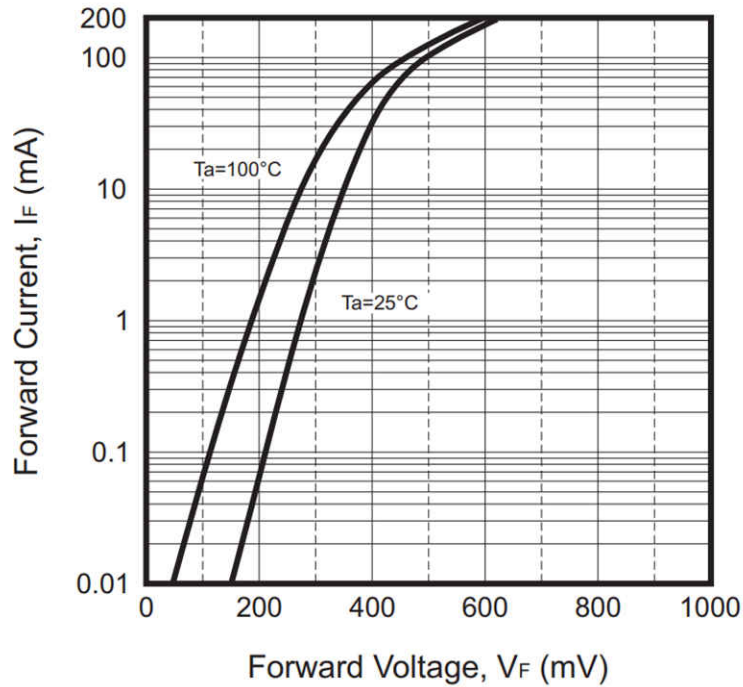


图 2-4. 二极管压降

### 2.3.3 SN74HCS72 和 TMUX1219

SN74HCS72 是具有负沿触发时钟输入的双 D 型触发器 (DFF)。该器件是 HCS 逻辑系列的一部分，此系列包括所有输入引脚上的施密特触发器架构，可提高噪声裕度和动态功耗。此外，与市场上的同类产品相比，HCS 系列具有最低的静态功耗和输入漏电流。

SN74HCS72 的特性：

- 宽工作电压范围：2V 至 6V
- 更宽泛的工作环境温度范围：-40°C 至 +125°C，TA
- 施密特触发器输入架构支持慢速输入转换并提高了噪声裕度
- 低功耗，典型静态 ICC 为 100 nA
- 8 ns 典型延迟，5V 电源

当 AMC23C10 比较器检测到过零时，SN74HCS72 DFF 提供具有极短延迟的下降沿检测以立即控制开关。推挽输出提供出色的驱动强度来控制 TPSI3050-Q1 使能信号。

触发器从 AMC23C10 检测 OUT2 的下降沿，有效检测过零电压。该设计仅检测 OUT2 的下降沿，因此电路的最大延迟为 60 Hz 源的一个完整周期或最大 17 ms。将开关 S1 与 TMUX1219 结合使用来启用或禁用过零开关电路。表 2-1 展示了基于 S1、EN、OUT2 和 1Q 状态的电路逻辑。

该电路在禁用背对背 FET 时检测过零电压。一旦启用 FET，反向并联二极管将不会被偏置以检测过零电压。如果将 S1 置于低电平，则过零检测电路被禁用。只有当 OUT2 从高电平变为低电平时，触发器才会改变状态。

如果 TPSI3050-Q1 被禁用，S1 为高电平，并且 OUT2 从低电平变为高电平，只有这时 TPSI3050-Q1 会将 VDRV 置为高电平。一旦将 VDRV 置于高电平，则 FET 将打开。

表 2-1. 输出逻辑表

SEL	OUT2_CLK	1Q	ZCD_EN	TPSI3050-Q1 状态
L	L	L	L	禁用
H	H->L	H	1Q	启用
H	L	H	1Q	启用
L	L->H	L	L	禁用

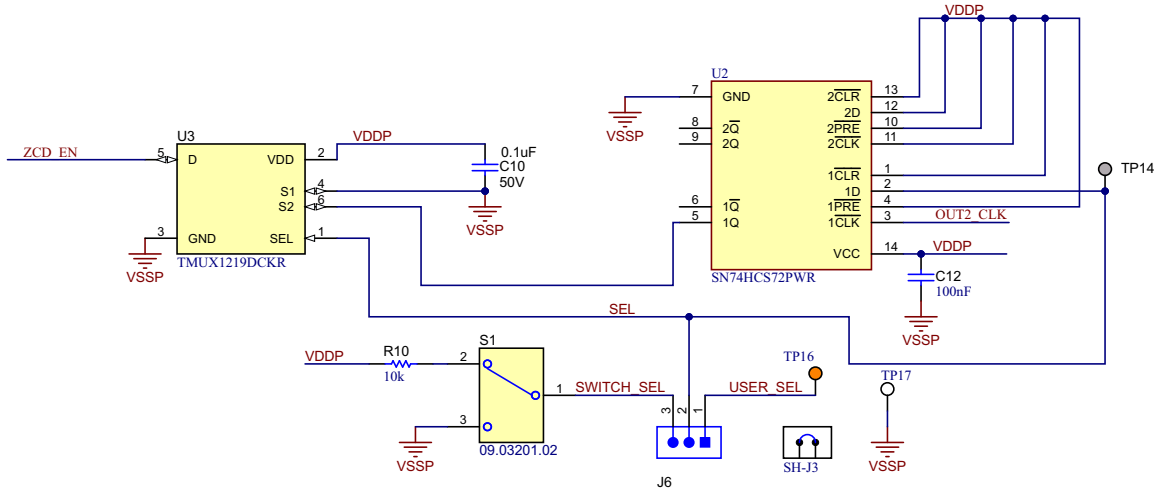


图 2-5. 触发器和多路复用器电路



### 3 硬件、软件、测试要求和测试结果

本参考设计使用以下设备进行了测试：

1. 5V 直流电源
2. 示波器
3. 隔离式探针
4. 交流电源
5. 负载电阻器

#### 3.1 硬件要求

#### 3.2 测试设置

若要测试过零检测参考设计，建议将示波器连接到 EN、SEL，将差分探头连接到交流电源，并将电流探头连接到负载。连接 5V 电源并通过测量 VDDH (10V) 和 VDDM (5V) 确保 TPSI3050-Q1 已上电。最后，连接交流电源和负载以测试设计。该电流应该如图 3-1 所示。

表 3-1. 测试点和连接器

名称		说明
J1、TP2	SW1	交流电源连接
J2	USER_EN	外部信号，用以控制 TPSI3050-Q1 EN 信号
	VDDP	初级侧的电源
	VSSP	初级侧的接地电源
J3		功率传输选择
J4、TP9	SW2	负载连接
J5	USER_EN	外部信号，用以控制 TPSI3050-Q1 EN 信号，没有过零检测
	EN	TPSI3050-Q1 高电平有效的驱动器使能端
	ZCD_EN	过零开关使能信号用以控制 TPSI3050-Q1
J6	SWITCH_SEL	使用开关 (S1) 控制多路复用器输出的信号
	SEL	用以控制多路复用器输出的信号
	USER_SEL	用以控制多路复用器输出的外部信号
TP1	VDDP	初级侧的 TPSI3050-Q1 电源
TP3	VDRV	TPSI3050-Q1 高电平有效的驱动器输出端
TP4	VG	电源开关的栅极电压
TP5	EN	TPSI3050-Q1 高电平有效的驱动器使能端
TP6	VDDH	TPSI3050-Q1 生成的高位电压
TP7	PXFR	TPSI3050-Q1 增加或减少功率传输
TP8	VDDM	TPSI3050-Q1 生成的 1/2 Vs
TP10、TP11	VSSS	次级侧的接地电源
TP12、TP13、TP17	VSSP	初级侧的接地电源
TP14	SEL	多路复用器输出选择信号
TP15	OUT2_CLK	隔离比较器的输出
TP16	USER_SEL	连接到 SEL 的外部信号

### 测试参考设计的步骤

1. J3 连接器应连接 R3 (20k  $\Omega$ )。这可实现极高的功率传输。
2. J5 连接器应将 ZCD\_EN 连接到 EN。这可以让 TPSI3050-Q1 由过零检测逻辑控制。
3. J6 将 SWITCH\_SEL 或 USER\_SEL 连接到多路复用器的 SEL 信号。在此测试中，提供了一个外部信号 (USER\_SEL) 来控制多路复用器输出。
4. 将 5V 电源连接到 VDDP。
5. 检查 VDDM 和 VDDH 电源轨是否分别为 5V 和 10V。
6. 将交流电源与负载连接。

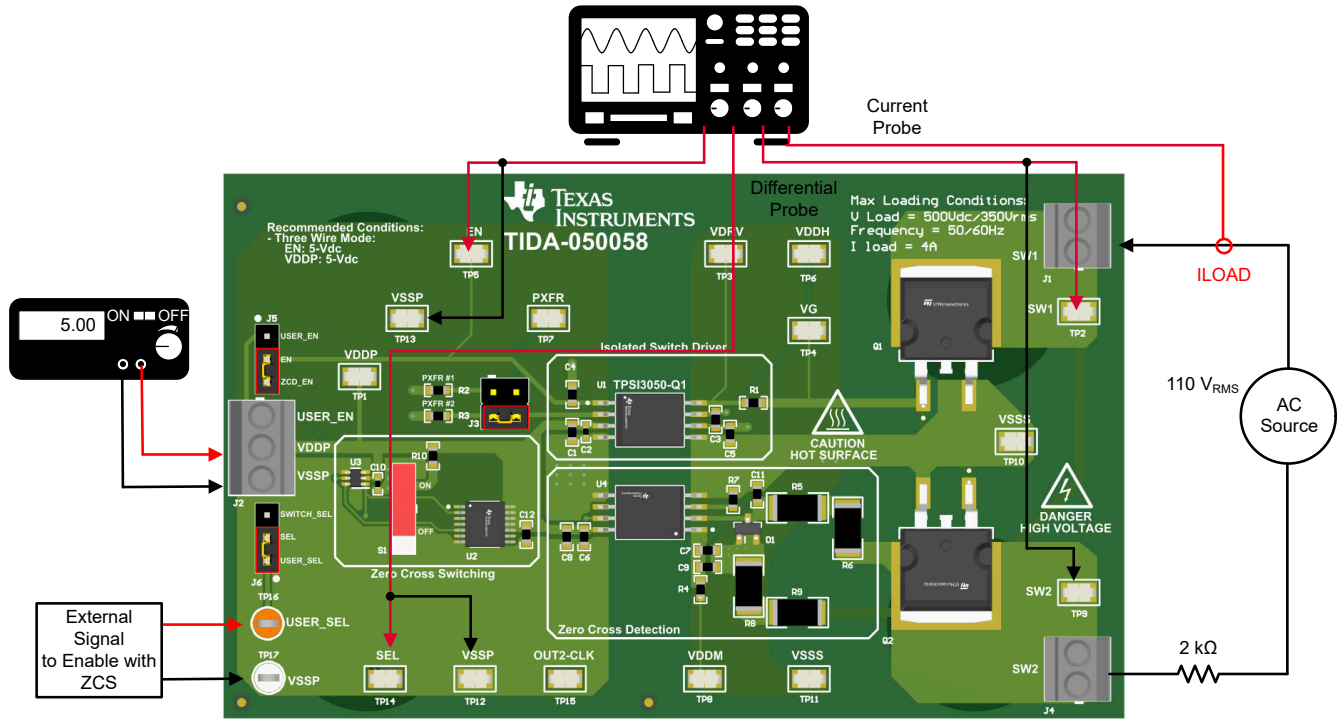


图 3-1. 测试设置

### 3.3 测试结果

图 3-2 展示了当交流负载的电压达到零电压点时 EN 信号如何改变状态。SEL 信号代表一个输入信号，表示用户正在尝试连接负载。该信号不会立即连接负载，因为电路会等待交流电压达到零的时刻。SW1-SW2 是背对背 MOSFET 上的压降，ILOAD 是负载上的电流。本设计使用触发器在 OUT2\_CLK 的下降沿检测 EN 信号。一旦 EN 为高电平，TPSI3050-Q1 就会连接负载。负载保持连接，直到用户为 SEL 发送低电平信号。本参考设计采用即时负载断开功能，使用户能够在任何时间点断开负载连接。

- SW2-SW1 是背对背 MOSFET 上的压降。
- EN 是 TPSI3050-Q1 的使能输入。
- SEL 是用户在需要连接负载时提供的输入。
- ILOAD 是通过负载的电流。

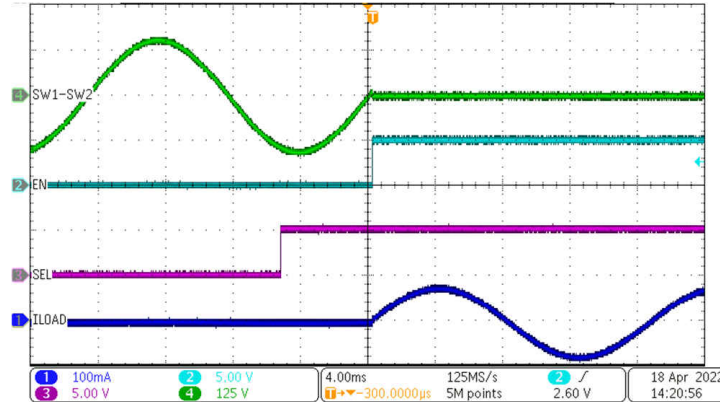


图 3-2. 过零电压开关

图 3-3 展示了图 3-2 的放大捕获图，用于测量传播延迟和电路开启时的电压。请注意，导通开关不会在零电压电平下发生，而是在 12V 下发生。该延迟由 (R4+R5) 电阻和功率 FET 的寄生源漏电容形成。连接负载的电压电平取决于偏置电阻器 R4、R5、R7、R8 的值和 FET 的寄生电容。偏置电阻值越低，连接负载的电压就越低。但是，正如前面在第 2.3 节中讨论的那样，务必要在开关电压精度和偏置电阻上的功率耗散之间进行权衡。

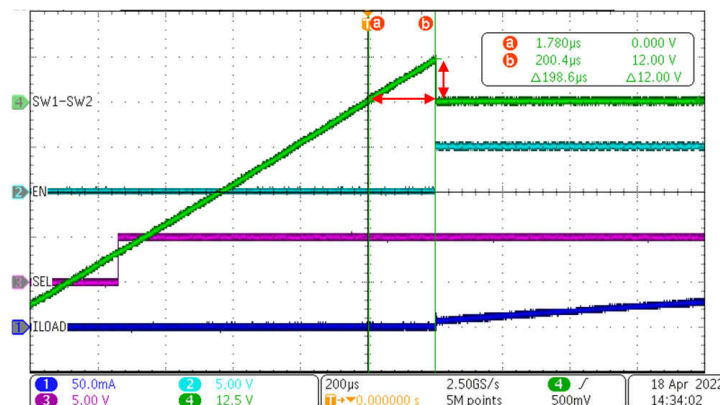


图 3-3. 过零电压开关放大图

## 4 设计和文档支持

### 4.1 设计文件

#### 4.1.1 原理图

若要下载原理图，请参阅 [TIDA-050058](#) 中的设计文件。

#### 4.1.2 BOM

若要下载物料清单 (BOM)，请参见 [TIDA-050058](#) 的设计文件。

#### 4.1.3 Altium 项目

若要下载 Altium Designer™ 工程文件，请参阅 [TIDA-050058](#) 中的设计文件。

#### 4.1.4 装配图

若要下载装配图文件，请参阅 [TIDA-050058](#) 的设计文件。

##### 4.1.4.1 Gerber 文件

若要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-050058](#) 中的设计文件。

### 4.2 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[TPSI3050-Q1 具有集成 10V 栅极电源的汽车类增强型隔离式开关驱动器 EVM 用户指南](#)。
2. 德州仪器 (TI)，[级联两个 TPSI3050 隔离式开关驱动器以提高栅极驱动电压应用手册](#)
3. 德州仪器 (TI)，[AMC23CxxEVM 隔离式比较器评估模块用户指南](#)。
4. 德州仪器 (TI)，[14-24-Logic-EVM 用户指南](#)。
5. 德州仪器 (TI)，[TMUX1219 评估模块用户指南](#)。

### 4.3 支持资源

[TI E2E™ 支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题可获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的 [《使用条款》](#)。

### 4.4 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

Altium Designer™ is a trademark of Altium LLC or its affiliated companies.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 5 作者简介

**Alex Triano** 是德州仪器 (TI) 固态继电器业务部的产品营销和应用经理，负责定义和开发使用电容和电感隔离技术的新一代固态继电器解决方案。凭借模拟电源领域的背景，**Alex** 在石溪大学完成本科学习后，于 2013 年加入 TI，成为电源接口业务部门的一员。他曾担任应用工程师，支持全球客户完成其电源设计，并帮助解决需要系统级分析和调试的复杂问题。他通过博客、视频和应用手册分享这些学习内容，以便向客户介绍这些产品并使其更易于设计。

**Francisco Lauzurique** 是德州仪器 (TI) 的应用工程师，负责提供固态继电器器件方面的支持。**Francisco** 在德州农工大学专攻模拟和混合信号，在取得电气工程专业理学学士学位后，于 2020 年加入 TI。他目前正在攻读德州农工大学电气工程专业理学硕士学位，专攻模拟和混合信号。

## 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