

Design Guide: TIDA-050080

具有过流保护功能的高压无源预充电参考设计



说明

此参考设计在高压直流总线（预充电）中实现了通用电路，采用的元件更新、更小、更具成本效益。此设计采用 TPSI3100-Q1 隔离式开关驱动器，可在电压域之间提供增强型隔离，并且不需要次级侧辅助电源来驱动场效应晶体管 (FET)。TPSI3100-Q1 还提供用于故障检测的集成数字比较器，在此设计中，这些比较器用于提供过流保护。此设计的额定值适用于 800V 电池管理系统 (BMS)，但也可以在 400V 系统中实现。

资源

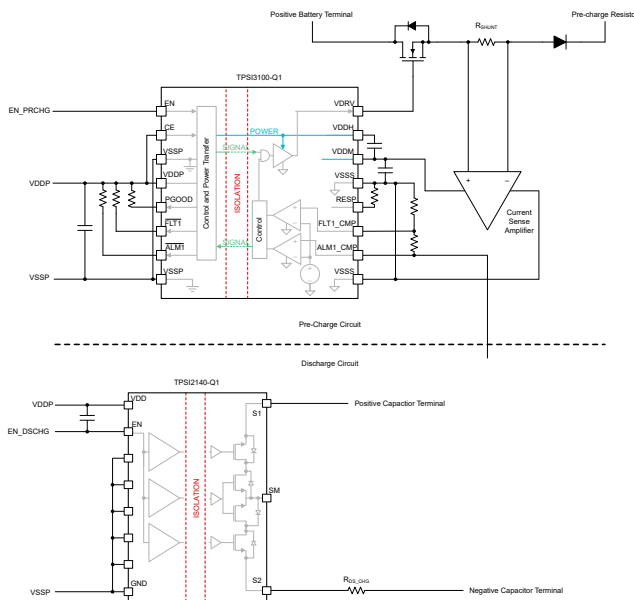
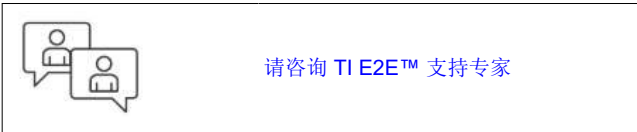
- TIDA-050080 设计文件夹
- TPSI3100-Q1, TPSI2140-Q1 产品文件夹
- INA180-Q1 产品文件夹

特性

- 5kV_{RMS} 增强型隔离
- 集成隔离式辅助电源
- 支持 800V 动力总成架构
- 提供低成本过流检测方案
- 能够在 500ms 内将 2mF 电容器充电至 800V

应用

- 高压电池系统
- 牵引逆变器
- 电池储能系统



1 系统说明

预充电是电动汽车和混合动力汽车（EV 和 HEV）中的一种常见电路，用于在将电源轨连接到电池之前准备高压直流电源轨。正负高压电源轨由直流链路电容器连接，这有助于在车辆运行期间连接和断开负载时稳定电源轨。预充电电路将直流链路电容器充电至电池电压，从而更大幅度地减少主接触器闭合时导致的浪涌电流。为了保证主接触器的正常运行，需更大幅度地减少浪涌，因为浪涌过高会导致触点焊接在一起，从而使触点出现缺陷。

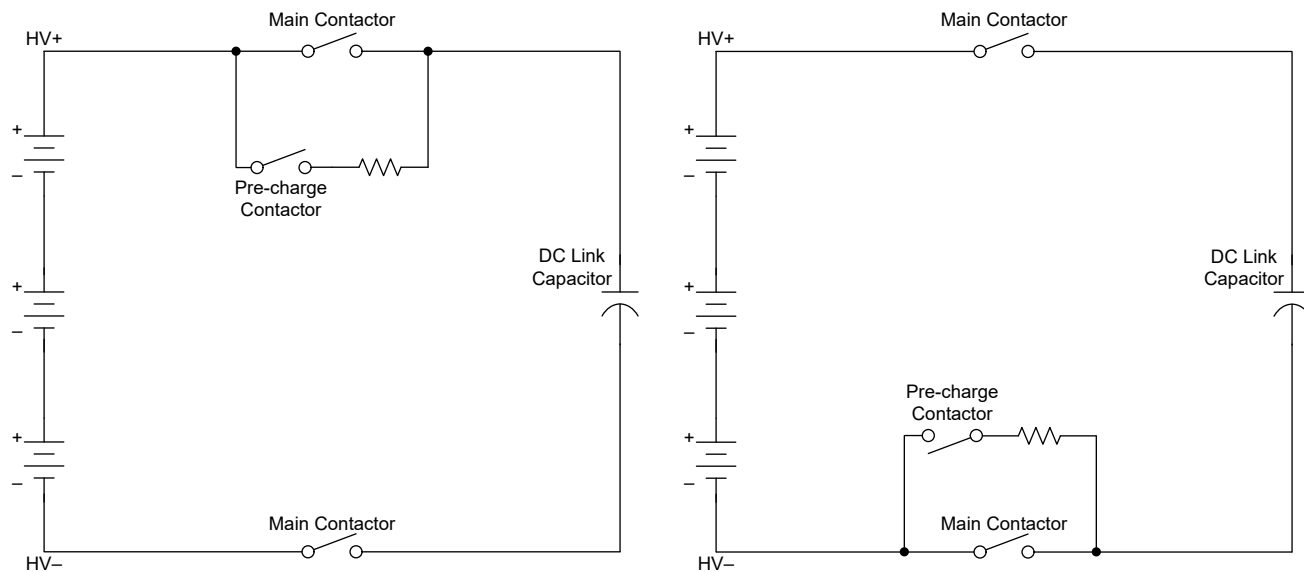


图 1-1. 预充电配置

此设计采用带固态继电器的无源预充电。在无源预充电中，开关静态关闭，直到电容器充电。图 1-1 展示了通常如何使用机械接触器或继电器实现预充电。此设计的目标是用固态继电器替代机械接触器，从而提供更可靠的设计。无源预充电的优点是复杂性低且开关噪声辐射低。这种预充电方法在业内非常普遍，因为它简单易行，而且功率电阻器的供应和选择也非常广泛。不过，由于这种设计的控制逻辑较少，因此设计时首先要考虑的是如何确定元件尺寸，使其能够承受功率并防止过流。

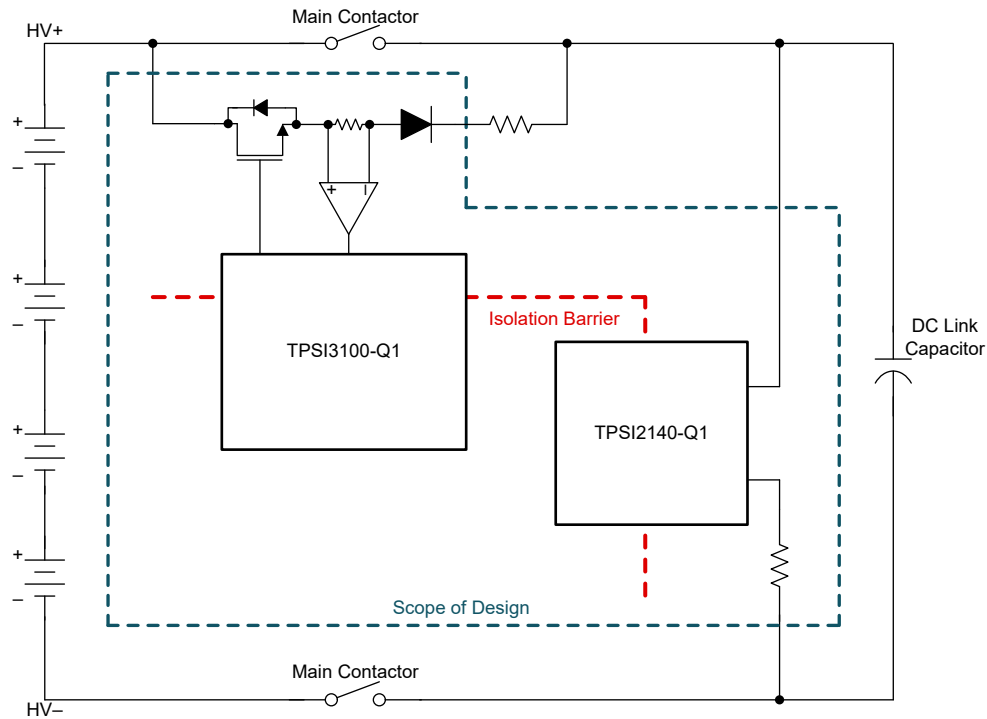


图 1-2. 设计范围

在大功率路径之外，此设计的控制电路由 FET 驱动器和过流检测电路组成。此设计使用 TPSI3100-Q1 隔离式开关驱动器，当与 FET 配合使用时，可创建无缝固态继电器设计，从而替代预充电接触器等接触器。此外，TPSI3100-Q1 中集成了故障和警报比较器。故障比较器在跳闸时禁用驱动器，并通过隔离栅发回信号。警报比较器仅在跳闸时发送信号。这些比较器与 INA180-Q1 电流检测放大器一起构成过流检测电路。电流检测放大器通过 TPSI3100-Q1 的内部次级侧电源（通过 VDDM 引脚生成的标称 5V 电源轨）供电。

此设计的最后一个元素是存储在电容器上的电压的放电路径。对于电动汽车，放电要求分为不同类型。对于安全性至关重要的事件（例如碰撞），电容器必须在几秒钟内放电，确切的时间因制造商而异。对于非紧急情况，可以在几分钟内放电。此设计采用非紧急放电功能，该功能由隔离式开关 TPSI2140-Q1 和功率电阻器组成。激活后，电容器会在大约 2 分钟内从 1000V 放电到 60V 以下。为了安全处理和测试此设计，也需要该放电电路。

2 系统概述

2.1 方框图

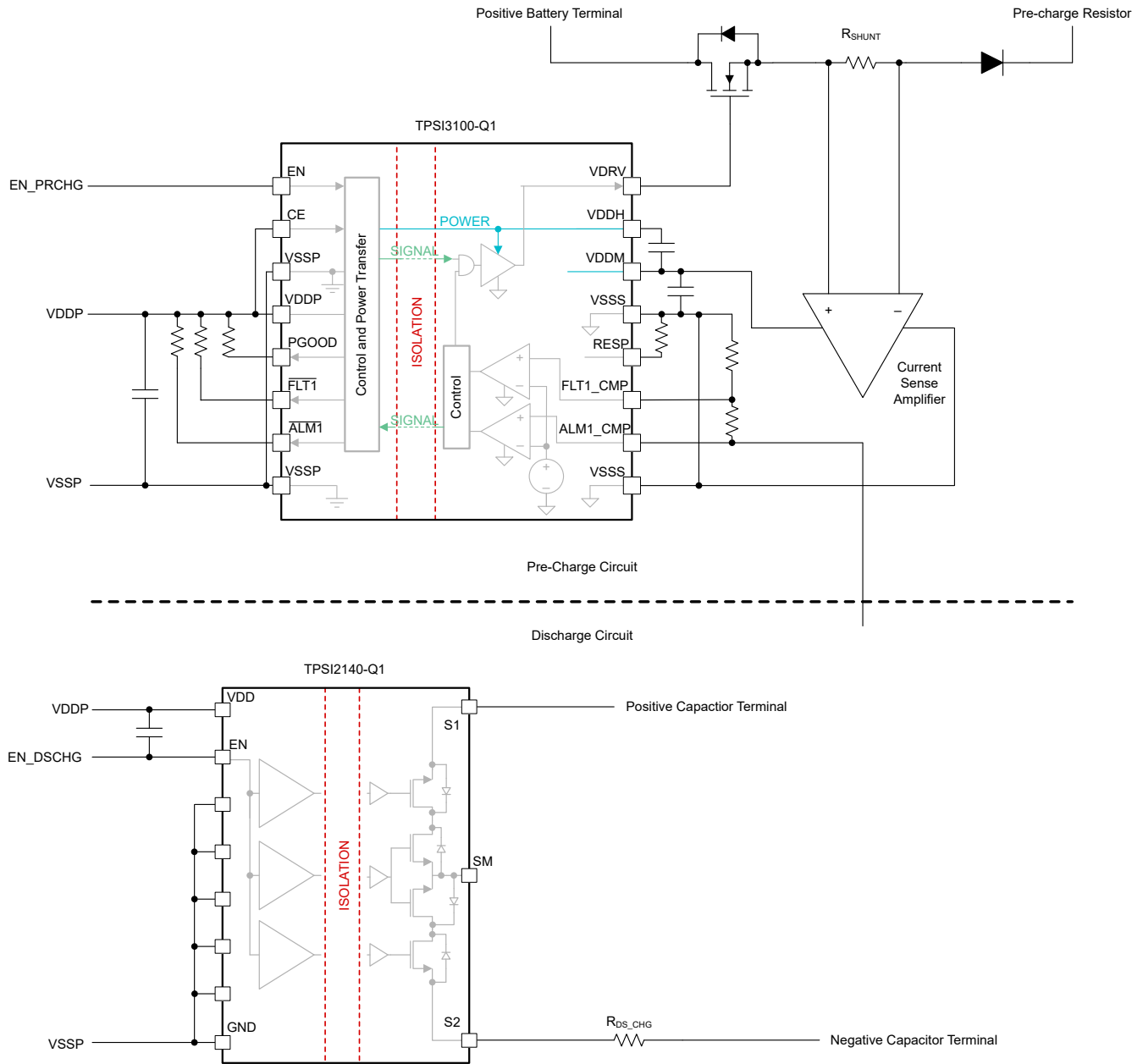


图 2-1. 方框图

2.2 设计注意事项

预充电设计过程从相关要求开始，因为要求是选择元件时的最重要方面。表 2-1 列出了相关要求。

表 2-1. 预充电设计要求

要求名称	值
预充电时间	0.5 秒
系统电压	800V (1000V)
直流链路电容	2mF

此设计必须在 0.5 秒内为系统电压高达 800V 的 2mF 直流链路电容器充电。但是，800V 电动汽车在满电荷时可以承载高达 1000V 的电压，因此设计中的元件必须相应地调整尺寸。

2.2.1 设计原理

概括来说，无源预充电电路是一种简单的 RC 电路，可以表示为指数衰减功能。使用方程式 1 计算电容器上的电压：

$$V_C = V_S \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (1)$$

其中

- V_S 是系统电压
- 时间常数 τ 或 τ 决定充电速率

对于该系统， 5τ 过后，预充电周期视为已完成。有些系统可能需要超过 5τ 的充电时间，才能确保主接触器两端的压降满足接触器开关要求。所需的系统电阻根据时间常数公式 (方程式 2) 计算得出：

$$5 \times \tau = 5 \times R \times C = 0.5 \text{ seconds} \quad (2)$$

代入直流链路电容并求解 R ，系统电阻为 50Ω 。在电源路径的所有元件中，预充电功率电阻器的功耗最大。但是，该元件的尺寸并非是在考虑峰值功率或平均功率的情况下确定的。要确定电阻器的大小，脉冲能量和长度最为重要。能量可以通过两种方式计算：作为随时间变化的功率积分 (方程式 3) 和作为电容器的函数 (方程式 4)：

$$E = \int_0^{0.5} 20,000 \times e^{-\frac{2 \times t}{0.1}} dt \approx 1000 \text{ J} \quad (3)$$

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = 1000 \text{ J} \quad (4)$$

2.2.2 电阻选择

通过了解脉冲能量，能够可靠地选择正确的电阻器。标准电阻器额定功率是指电阻器在特定环境温度 (通常是 25°C) 下能够连续承受的最大功率。由于预充电不是一个均匀或连续的功率周期，因此选择 20kW 电阻器是错误的。此外，这种尺寸的电阻器非常昂贵、较重，甚至可能根本不存在。与此设计相关的电阻器特性是脉冲能量处理能力，这取决于电阻元件的热稳健性和散热能力。对于这种设计，绕线电阻器是理想选择，因为这些电阻器的内部 (称为磁芯) 以及通常在线圈 (称为外壳) 周围都有额外的质量。这种额外的质量可吸收高功率脉冲产生的热量。

要确定电阻器是否能够处理预充电脉冲 (通常可以通过数据表中包含的图表来确定)，有以下几种方法。第一种方法是通过短期过载额定值。该额定值意味着在指定时间段内，电阻可以承受常规额定功率的几倍。绕线电阻器的短期过载通常为额定功率的 5 倍或 10 倍，持续 5 秒钟。有时还可以进一步推断并以图表形式表示：如果电阻器的过载为 5 倍 \times 5 秒钟，那么如果数据表明确说明，该电阻器也能承受 25 倍 \times 1 秒钟的过载。如果电阻器的额定功率为 100W，则这种情况下的过载脉冲能量为 2500J。这并不意味着电阻器可以处理 2500J 的任何脉冲长度。脉冲长度过短会使线圈没有足够的时间将热量散发到整个磁芯和外壳中，从而导致导线发生故障。

第二种方法是通过脉冲能量图。此图表通常在 x 轴显示电阻，采用线性或对数形式，在 y 轴显示脉冲能量。图表相对简单直观，展示了系列中每个电阻器的脉冲能量限制。要参考的第三张图表通常标记了脉冲性能。此图表在 x 轴显示脉冲持续时间，在 y 轴显示最大功率，两者均采用对数形式。

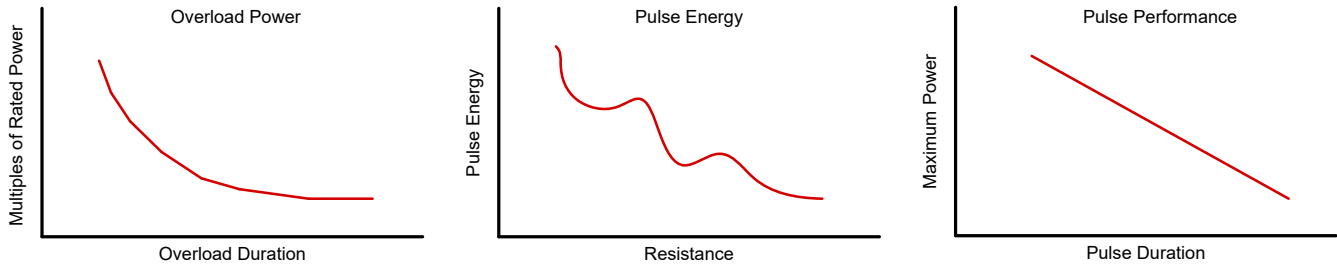


图 2-2. 不同的功率和能量图

为了降低成本，设计人员可以采用尽可能小的电阻器来处理预充电脉冲。在这种情况下，或者如果未发布任何脉冲信息，请与制造商确认特定电阻器的能量限值是多少。由于能量限值可能会根据脉冲类型而变化，因此设计人员必须根据电容脉冲确认电阻器。

2.2.2.1 晶体管和二极管选择

在此设计中，首先要考虑的是晶体管和二极管的击穿电压和阻断电压。由于这用于 800V BMS，因此阻断电压必须更高。请注意，电动汽车电池的充电电压通常高于系统电压；800V 电动汽车在充满电时可保持高达 1000V 的电压。选择能够在电动汽车的完全充电电压基础上提供额外裕度的击穿电压。对于此设计，FET 和二极管的击穿电压必须为 1200V。

这些元件（尤其是晶体管）的下一个考虑因素是功率、热量和时间。与电阻器类似，连续特性（例如 FET 的额定连续漏极电流）用处不大，原因有两个：此类特性是在特殊热场景下确定的，没有考虑时间因素；预充电周期是脉冲（而不是连续）。使用 FET 数据表上的安全工作区图表来确定 FET 是否正常。在预充电等 RC 电路中，电阻器中的功率耗散在一个时间常数后接近初始幅度的三分之一。将其与此设计联系起来，在确定元件尺寸时值得考虑的脉冲长度为 100ms。用于 1200V 汽车系统的 FET 通常会在安全工作区图上显示 100ms 曲线，如果设计中的预期峰值电流位于 100ms 曲线和导通电阻限制曲线的下方，则 FET 可能足够大。

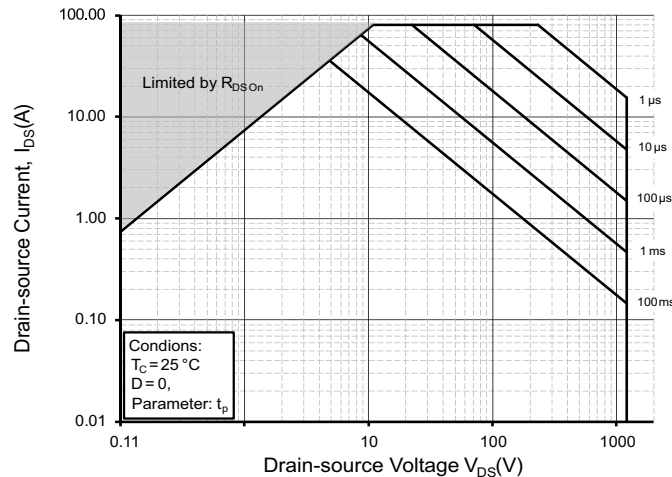


图 2-3. Wolfspeed E3M0075120D SiC MOSFET 的安全工作区

需要额外检查的最后一个元件是二极管。如前所述，需要 1200V 的反向阻断电压，并且二极管必须承受此设计的最大正向电流。正向电流能力可通过连续正向电流额定值确认。对于此设计，此额定电流不必大于电路的峰值电流，因为二极管非重复的峰值正向浪涌电流额定值可能比此峰值电流大几个数量级。为安全起见，选择用于此设计的二极管应确保连续正向电流不超过峰值正向电流的 60% 至 80%。这样可以保证二极管能够承受因电流水平过低而无法触发过流保护的软短路。此外，如果需要具有更低 $R_{DS(on)}$ 和更低压降的设计，则可以使用另一个阻断 FET，但这会增加成本。

2.2.3 过流检测 - 短路保护

TPSI3100-Q1 在次级侧包含两个高速比较器。两个比较器的信息传输到初级侧；但是，故障比较器跳闸后会使得驱动引脚无效。从系统级角度而言，这些信号可发送至微控制器，以提供电流、电压或温度监控功能。尽管故障比较器不需要监测器来禁用驱动器，但这些信息仍然很有用。在此设计中，这些比较器用于过流保护电路。该电路包含单向电流检测放大器 INA180-Q1，其输出端接入电阻分压器，为 TPSI3100-Q1 的故障和警报比较器馈送电压。故障电流为 25A，因为在达到 1000V 满电荷时，初始电流可以达到 20A。为了降低整个设计周期内出现误报的风险，请增加一些裕度。

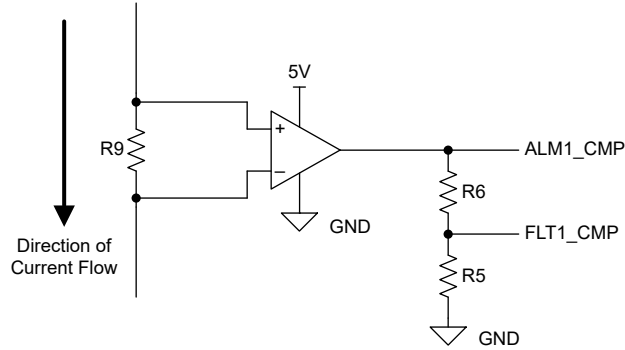


图 2-4. 电流检测方案

ALM1_CMP 比较器的配置方法有多种。由于该比较器不能禁用驱动器，因此在信号的精确含义方面有更大的灵活性。表 2-2 展示了三个 ALM 配置示例。

表 2-2. ALM 配置示例

配置	FLT 电流	ALM 电流	R9	R6	R5	ALM 用途
1	2A	20A	0.75mΩ	2.5kΩ	10kΩ	ALM 必须在 10ms 至 50ms 内置为无效
2	25A	12.5A	1.2mΩ	10kΩ	10kΩ	ALM 必须在 50ms 至 70ms 内置为无效
3	25A	2A	7.5mΩ	115kΩ	10kΩ	ALM 必须在不到 300ms 内置为无效

在配置 1 中，不会定期触发警报信号，因为这种情况需要 1000V 的电荷。因此，该警报信号可用于警示电流已达到一定水平，如果不快速解决，可能会对电源路径中的元件造成损害。由于驱动器在 25A 时被禁用，因此预期电流范围为 20A 至 25A。在该运行模式下，警报保持有效的合理时间段为 10ms 至 50ms。警报信息在 30 μs 内通过隔离栅进行传输，这使得微控制器能够在警报信号保持有效时采取行动。

在配置 2 和 3 中，预计警报信号会跳闸并保持跳闸更长时间。与配置 1 类似，微控制器可负责计时，并有权在超过时限禁用器件。配置 2 为停用警报信号提供了更多的缓冲时间，配置 3 是典型预充电周期的时间中点。

除电流和电压检测之外，警报和故障信号还可用于温度或湿度等更多用途。由于信号传输到初级侧的延迟较低，因此可以通过微控制器进行更复杂的操作。

2.3 主要产品

2.3.1 TPSI3100-Q1

TPSI3100-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设计。当栅极驱动电压为 15.8V，峰值拉电流/灌电流为 1.5/2.5A 时，可以使用大量电源开关来满足多种应用需求。TPSI3100-Q1 可通过初级侧电源自行产生次级辅助电源，因此无需隔离式次级电源偏置。TPSI3100-Q1 通过标称 5V 电源轨 (VDDM) 提供额外电源，供辅助电路使用以执行各种功能，例如电流和电压监测或远程温度检测。

TPSI3100-Q1 还集成了一个通信反向通道，该通道可将状态信息从次级侧传输到初级侧。当比较器输入 FLT1_CMP 超过基准电压时，驱动器立即被置为低电平，并且 FLT1 也被驱动为低电平，向系统指示发生了故障。这对于在发生紧急事件（例如过流检测）时以低延迟禁用外部开关非常有用。当比较器输入 ALM1_CMP 超过电压基准时，ALM1 信号被置为低电平，但驱动器不执行任何操作。这可用作过热或过压事件的警报或警告指示器。

在此设计中，5V 电源以 1100nF 的输入电容为初级侧引脚 VDDP 和 CE 供电。外部 5V 信号连接到 EN 引脚。信号引脚 PGOOD、nFLT 和 nALM 连接到上拉网络。最后，VSSP 引脚一起接地。

在次级侧，选择 VDDH 和 VDDM、VDDM 和 VSSS 之间的电容器，分别命名为 C_{DIV1} 和 C_{DIV2}，以保持 1:3 的比率，或者换言之 C_{DIV2} = 3 × C_{DIV1}。过流检测电路的电流检测放大器由 VDDM 引脚供电。RESP 引脚通过 100kΩ 电阻器连接到 VSSS，FLM1_CMP 和 ALM1_CMP 引脚连接到过流检测电路的电阻分压器。

2.3.2 INA180-Q1

INA180-Q1 电流检测放大器专为成本优化型应用设计。这些器件是电流检测放大器（也称为电流分流监控器）的一部分，可在 -0.2V 至 $+26\text{V}$ 范围内的共模电压中检测电流检测电阻上的压降（与电源电压无关）。INA180-Q1 在四个固定增益器件选项中集成了匹配的电阻增益网络： 20V/V 、 50V/V 、 100V/V 或 200V/V 。此匹配的增益电阻网络可更大限度地减少增益误差，并降低温漂。

对于此设计，INA180-Q1 的选定增益为 20V/V ，并通过 TPSI3100-Q1 的 VDDM 引脚以 100nF 的输入电容供电。该器件的输出用作过流检测电路的警报信号，并为故障信号馈入电阻分压器。可以使用任何类似的电流检测放大器。

2.3.3 TPSI2140-Q1

TPSI2140-Q1 是一款隔离式固态继电器，专为高电压汽车和工业应用而设计。TPSI2140-Q1 与 TI 具有高可靠性的电容隔离技术和内部背对背金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 整合在一起，形成了一款完全集成式设计，无需次级侧电源。

在此设计中，TPSI2140-Q1 用作隔离开关，用于在预充电周期后使电容器放电。该开关与一个高阻值电阻器串联，可实现低功耗放电（大约需要两分钟才能达到低于 60V 的安全电压电平）。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

图 3-1 表示经过测试的设计。

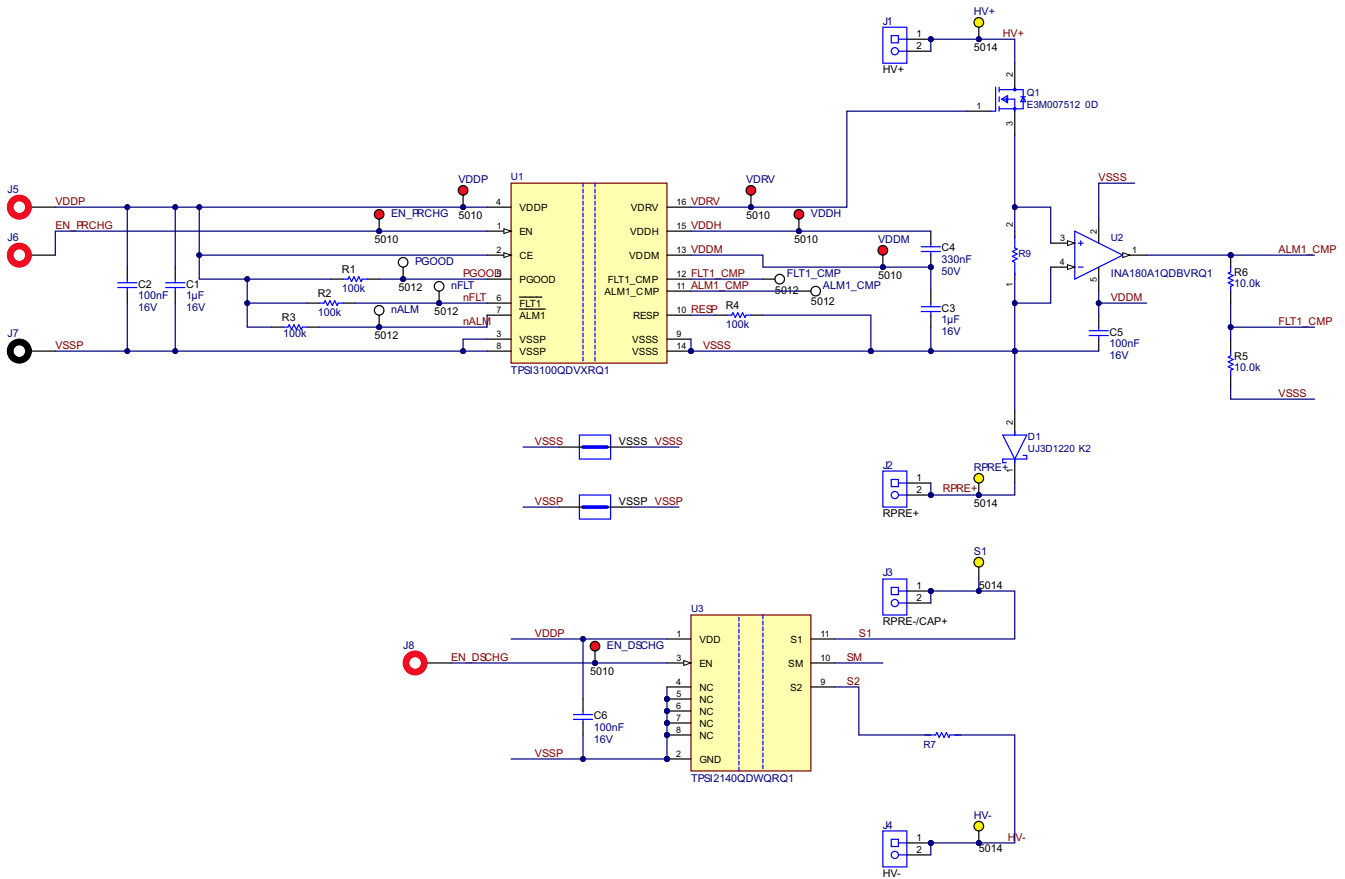


图 3-1. 参考设计原理图

图 3-2 是最终 PCB，尺寸为 140mm × 100mm 且高度约为 55mm。

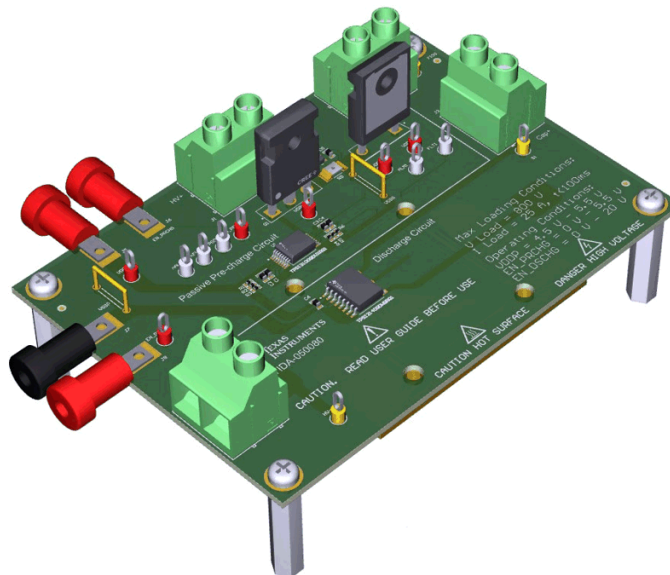


图 3-2. 参考设计电路板

3.1.1 外部硬件要求

所需的外部硬件列表如下：

1. 高压外壳
2. 电源
 - a. 5V 直流电源
 - b. 能够至少提供 800V、25A (最好是 1000V、30A) 的高压电源
3. 示波器
4. 隔离式探针
5. 50 Ω 的外部负载电阻器
6. 约 2mF 的外部电容器组

3.2 测试设置

要测试无源预充电参考设计的正常运行情况，请实施以下步骤：

1. 将 5V 电源连接到 VDDP、EN_PRCHG 和 EN_DSCHG 的香蕉插孔，并将负极引线连接到 VSSP。
2. 在放入外壳或连接高压电源之前，为 TPSI3100-Q1 供电并验证初级侧和次级侧的所有电压是否符合预期。
3. 使用 TPSI2140-Q1 执行第 2 步，通过测量 S1 和 S2 之间的电阻，验证内部 FET 是否导通。
4. 关闭 5V 电源，电缆保持连接状态。
5. 将电路板放置在外壳中，将预充电电阻器的一根引线连接到 J2，将另一根引线连接到 J3。
6. 将电容器的正极端子连接到 J3，负极端子连接到 J4。
7. 将高压电源正极引线连接到 J1，负极引线连接到 J4。
8. 将隔离式探头连接到 S1-HV₋ 以在电容器充电时测量电容器两端的电压。
9. 将隔离式探头连接到 VDRV-VSSS，以显示驱动引脚的阶跃。
10. 合上外壳并给高压电源通电。
11. 为 5V 电源供电并观察周期，一秒钟后关闭电源。
12. 关闭高压电源
13. 再次为 5V 电源供电以使 EN_DSCHG 通电，从而使电容器放电
 - a. 请至少等待 2 分钟，然后再打开高压外壳。
 - b. 如果电源能够显示恒定的电容器电压读数，这可用于显示放电周期的进度

3.3 测试结果

图 3-3 展示了典型的预充电周期，图 3-4 展示了放电周期。

- VDRV 是 TPSI3100-Q1 次级侧的驱动引脚
- VCAP 是电容器组两端的电压
- EN_DSHCG 是 TPSI2140-Q1 的使能信号

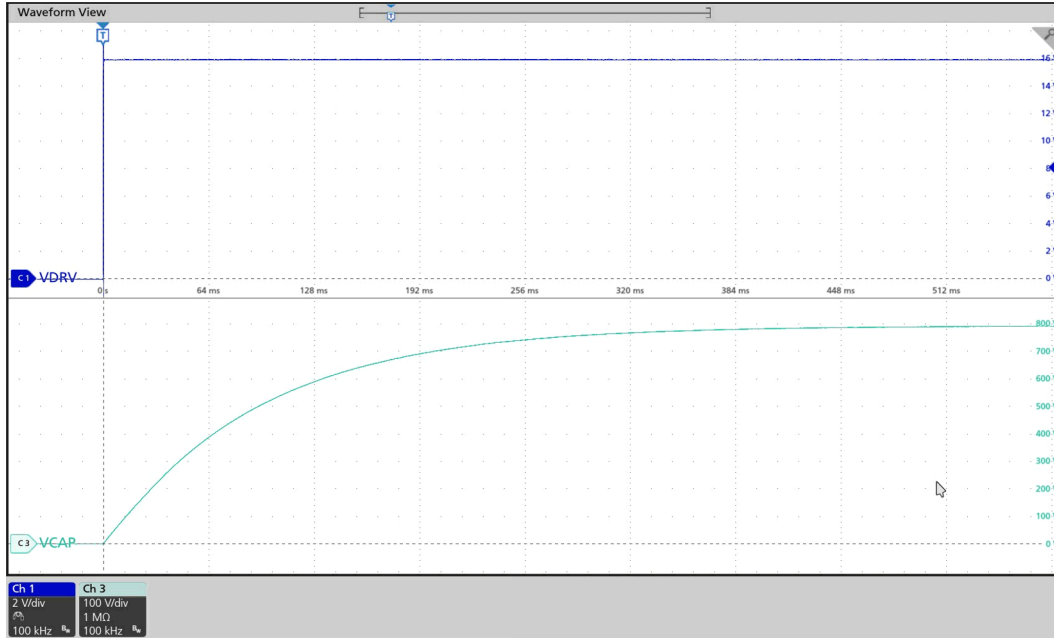


图 3-3. 预充电周期

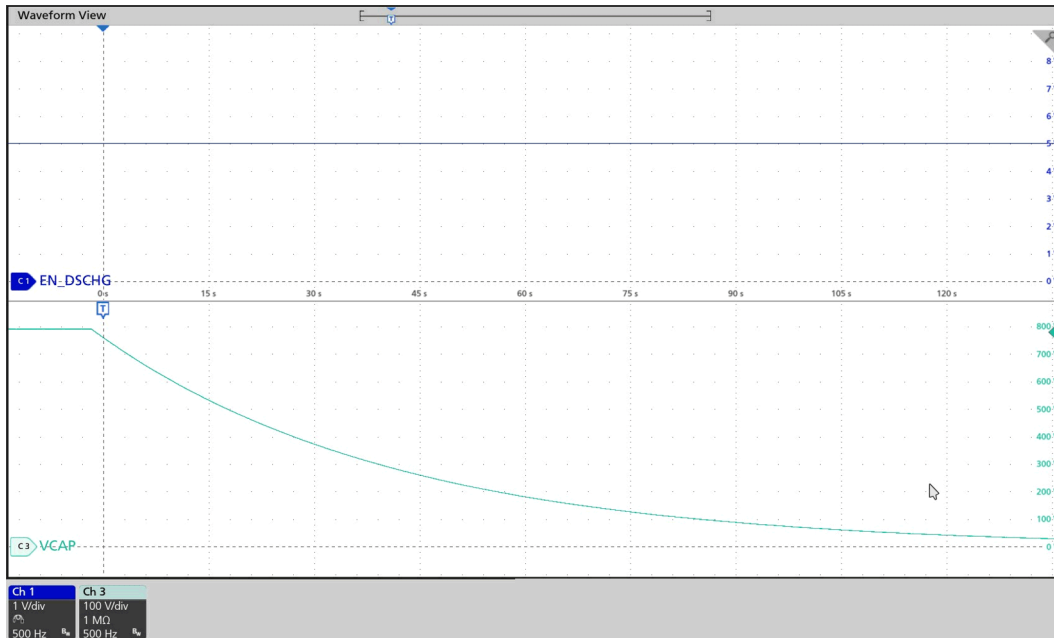


图 3-4. 放电周期

图 3-5 展示了电流超过 25A 限制后 VDRV 引脚将会禁用。在自动恢复时间段过后，驱动引脚将重新置位。同样，在图 3-6 中，初级侧的 nFLT 引脚会在 30 μ s 后拉低，以报告故障。又经过 30 μ s 后，该引脚被重新上拉。

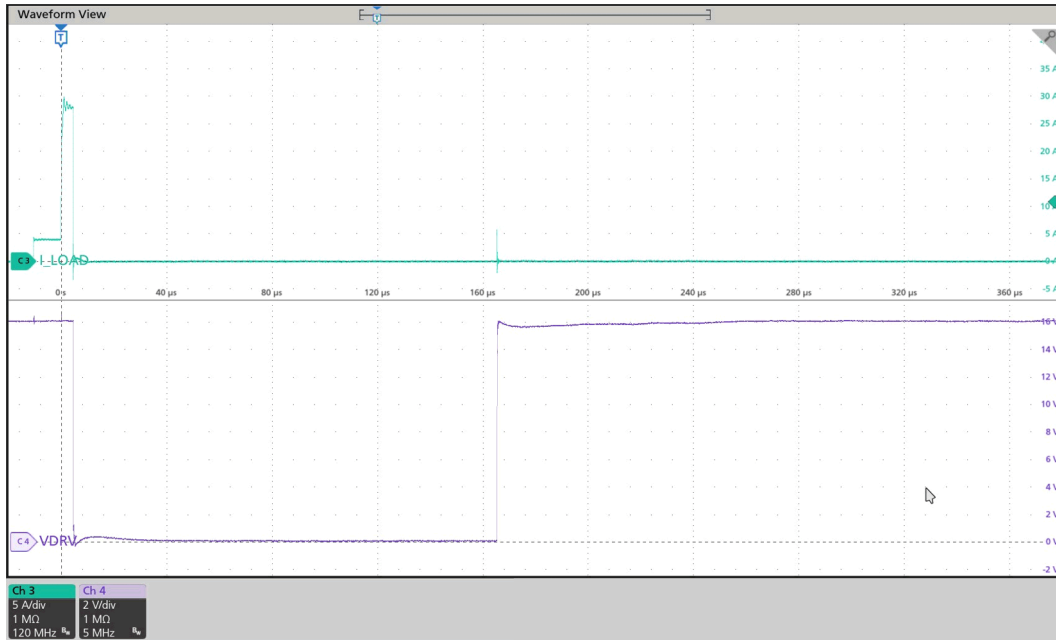


图 3-5. VDRV 禁用和重新启用

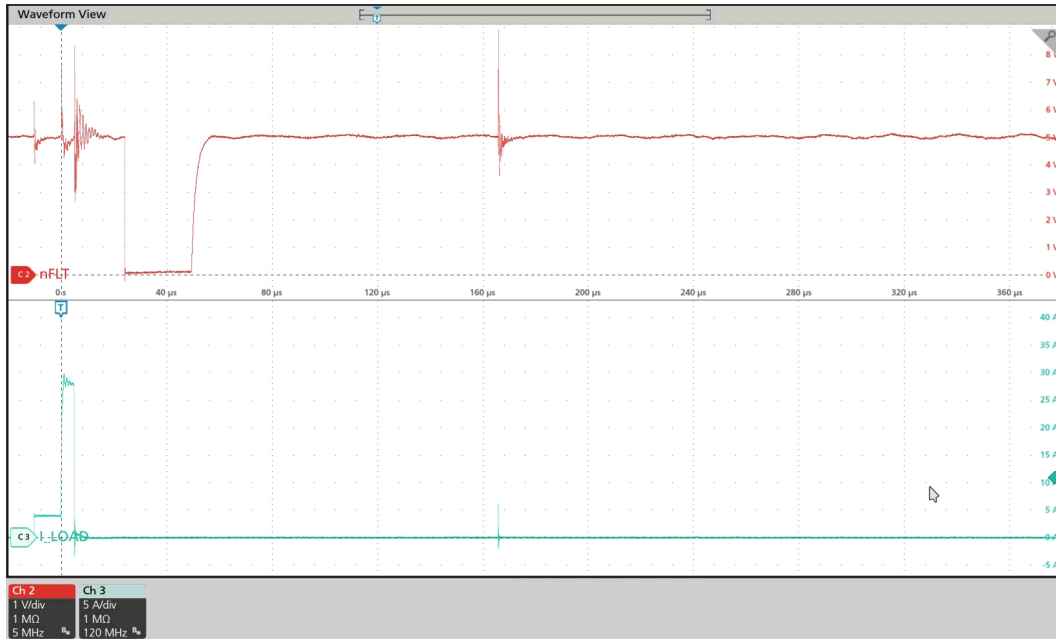


图 3-6. 初级侧故障报告

4 设计和文档支持

4.1 设计文件

4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-050080](#) 中的设计文件。

4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-050080](#) 中的设计文件。

4.2 工具

工具

PSpice- FOR-TI

适用于 TI 设计和仿真工具的 PSpice®：PSpice® for TI 可提供帮助评估模拟电路功能的设计和仿真环境。此功能齐全的设计和仿真套件使用 Cadence® 的模拟分析引擎。PSpice for TI 可免费使用，包括业内超大的模型库之一，涵盖我们的模拟和电源产品系列以及精选的模拟行为模型。

4.3 文档支持

- 德州仪器 (TI)，[为何高压系统需要预充电电路应用简报](#)
- 德州仪器 (TI)，[TPSI2140-Q1 具有 2mA 雪崩能力的汽车级 1200V、50mA 隔离开关数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[TPSI3100-Q1 具有 15V 栅极电源和两个隔离式比较器的汽车级增强型隔离式开关驱动器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[INAx180-Q1 汽车级低侧和高侧电压输出、电流检测放大器数据表](#)

4.4 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、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，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](#)。

4.5 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

PSpice® is a registered trademark of Cadence Design Systems, Inc.

所有商标均为其各自所有者的财产。

5 作者简介

SAMUEL SKRANAK 是德州仪器 (TI) 的产品营销工程师，负责为汽车智能电子保险丝和高侧开关提供支持。

Sam 于 2023 年加入 TI，此前曾在达拉斯-沃斯堡地区的城市交通系统工作。Sam 于 2021 年毕业于卡尔加里大学，获得电气工程理学学士学位。

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司