

## Application Note

## 高侧开关及控制器基础知识



Samuel Skranak, Olivia Brandel, Patrick Shalton

## 摘要

德州仪器 (TI) 高侧电源开关是集成了保护和诊断功能的电源管理器件，专为驱动电阻、电容和电感负载而设计。该产品系列包括高侧开关 (集成式 FET)、高侧开关控制器 (外部 FET) 和智能电子保险丝高侧开关 (集成式或外部 FET 设计，具有基于 I<sup>2</sup>T 的线束保护)。TI 提供 12V、24V 和 48V 产品组合，专门用于支持汽车区域、车身和电池管理系统，以及工业自动化和机器人技术。

高侧开关和控制器基础知识介绍了 TI 高侧产品系列，概述了与其他电源开关设计的比较情况，并解释了架构和应用的差异。本文档还概述了许多保护和诊断特性。总之，本文档对 TI 高侧开关、高侧开关控制器和智能电子保险丝高侧开关进行了基础讲解。

## 内容

<b>1 简介</b> .....	2
1.1 高侧开关同其他电源开关 IC 的比较情况.....	3
1.2 常见汽车及工业标准.....	10
<b>2 高侧开关及控制器的架构和应用差异</b> .....	13
2.1 架构差异.....	13
2.2 应用差异.....	14
2.3 摘要及产品系列选择矩阵.....	15
<b>3 高侧开关及控制器的核心特性</b> .....	17
3.1 保护特性.....	17
3.2 诊断功能.....	21
<b>4 专有特性</b> .....	23
4.1 电容充电特性.....	23
4.2 串行通信和相应特性.....	24
4.3 适用于工业系统的特性：增强的 EFT、反向电流阻断、LED 驱动.....	24
4.4 其他专有特性.....	26
4.5 智能电子保险丝高侧开关保护特性.....	27
<b>5 总结</b> .....	29
<b>6 参考资料</b> .....	29

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

在基础层面，高侧开关和高侧开关控制器（通常称为高侧栅极驱动器）是用于驱动阻性、容性和电感负载的电源管理器件。TI 的高侧电源开关产品系列还通过诊断及保护机制提供智能控制。高侧开关将 MOSFET 集成到同一封装中，而控制器为外部 MOSFET 提供栅极驱动。在集成式或外部 FET 解决方案之间进行选择时，电流要求是最决定性的因素。散热及裸片尺寸限制会限制高侧开关的最大负载电流。因此，高侧开关控制器是不能使用高侧开关的高电流应用的替代方案。高侧开关和控制器具有不同的通道数，可减少每个模块的器件数量，从而减小系统尺寸并降低成本。此外，高侧开关提供各种 MOSFET 导通电阻，根据器件必须驱动的电流量来定制器件。

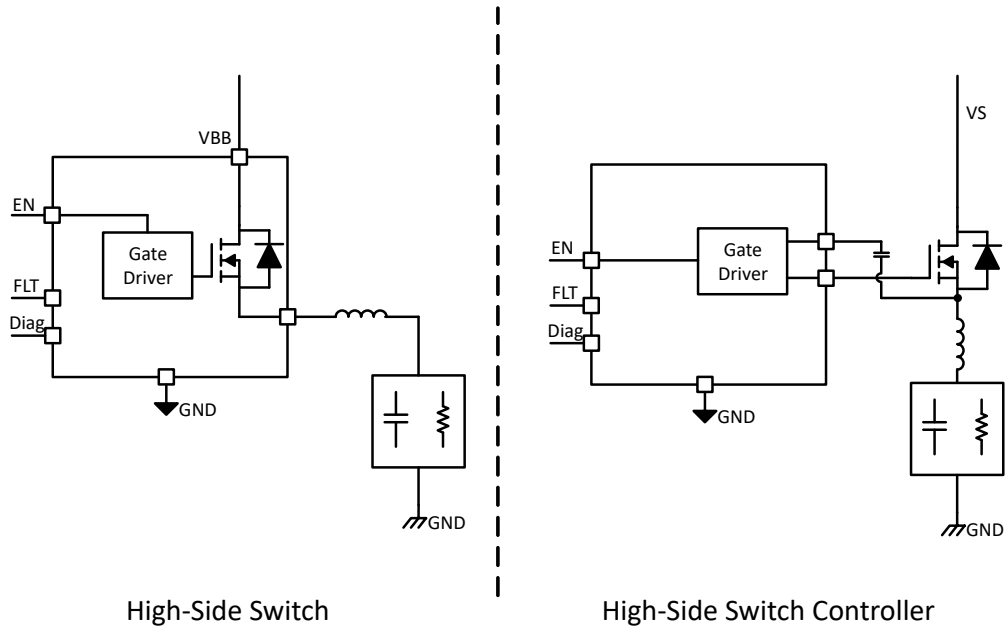


图 1-1. 具有集成 FET 的高侧开关（左）和具有外部 FET 的高侧开关控制器（右）的基本示意图

## 1.1 高侧开关同其他电源开关 IC 的比较情况

可使用分立或集成解决方案在电压源及负载之间切换电气连接。第 1.1.1 节概述了用分立式元件实现高侧开关的三种方法。后续各节将介绍 TI 高侧开关与其他 TI 高侧 IC ( 负载开关、热插拔控制器、电子保险丝 ( 集成热插拔 ) 和电机驱动器 ) 的比较情况。此外，第 1 节后面的小节阐明了 TI 电源开关 IC 的术语和命名惯例。图 1-2 展示了一个示例系统方框图，其中包含高侧开关和控制器以及其他电源开关 IC。

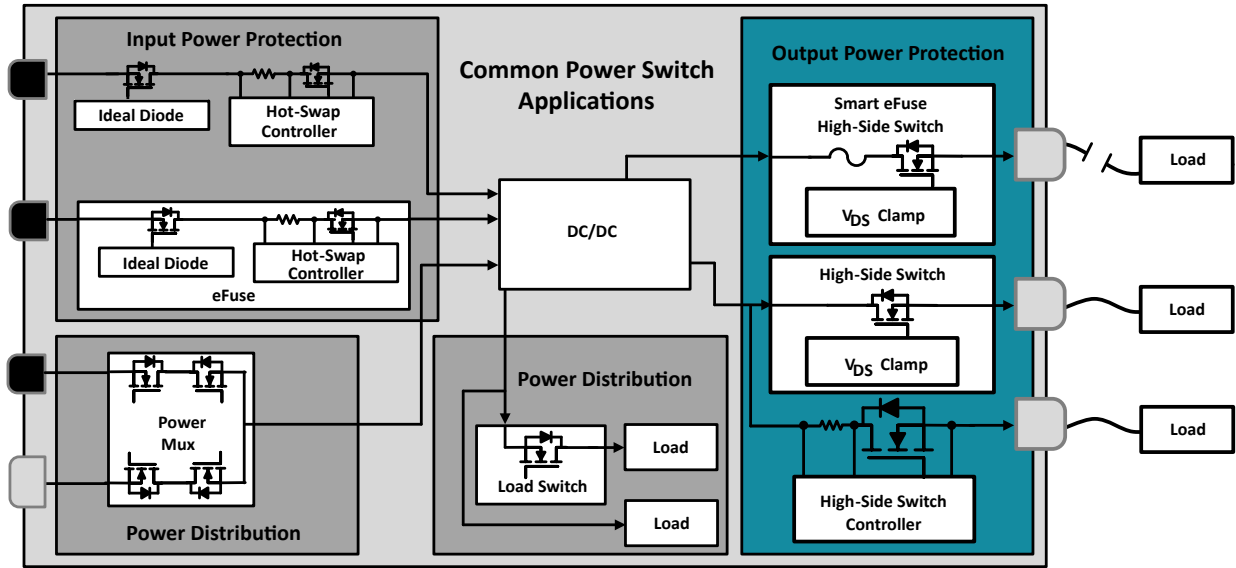


图 1-2. 简化版系统方框图，重点介绍了高侧开关、高侧开关控制器和智能电子保险丝高侧开关的典型用例

### 1.1.1 分立式高侧实现

高侧开关可通过 MOSFET 及分立式控制电路实现。为了比较分立式和集成电路的解决方案复杂性，第 1 节回顾了从最简单到最复杂的三个高侧开关分立式实现级别。

表 1-1. 分立式高侧实现的比较

	一级：NFET 控制的 PFET	二级：带有升压转换器的 NFET	三级：NFET、升压转换器、分立式保护	高侧开关
实现	分立式	分立式	分立式	集成式
总结	热性能较差 FET 尺寸较大 功率耗散较高	平均热性能 高功率耗散	大型设计尺寸 复杂设计	紧凑的设计尺寸 高效散热封装 使用极少的外部元件实现 集成保护

### 1.1.1.1 一级：NFET 控制的 PFET

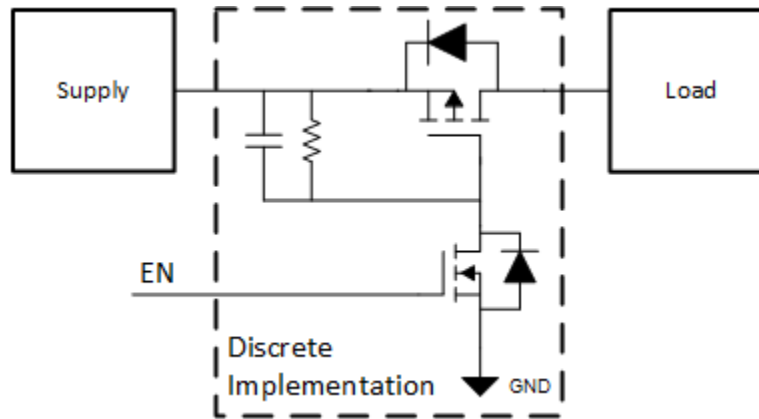


图 1-3. 一级分立式实现：NFET 控制的 PFET

最简单的分立式高侧开关实现是通过 NFET 启用的 PFET 导通 FET。PFET 的源极有一个电阻器及电容器连接到其栅极以提供压摆率控制。可以在 PFET 的栅极和源极之间添加一个 TVS 二极管，以使栅源电压 ( $V_{GS}$ ) 保持在 PFET 的绝对最大  $V_{GS}$  限值范围内。

这种分立式电路高度未优化。首先，PFET 的热性能会很差，因为 PFET 的单位面积导通电阻比 NFET 更高，从而在给定的负载电流下使 PFET 解决方案更大且热效率较低。此外，PFET 可能永远不会实现最小导通电阻所需的栅源电压，这会在给定负载电流下增加 FET 所需的尺寸。最后，启用的 NFET 将持续汲取电流，并且 TVS 二极管在激活时将短路，从而在不必要的高电平下耗散功率和泄漏电流。

### 1.1.1.2 二级：带有升压转换器的 NFET

改进第一级实现的一种方法是使用 NFET 代替 PFET 并且在深度线性区域中操作它。为此，需要使用一个升压转换器将栅极电压增加到高于漏极。虽然可以使用升压转换器，但栅极驱动器在成本、性能和噪声方面更具优势。与一级实现相比，二级实现的主要优势在于二级实现的单位面积导通电阻低得多，并且热效率更高，因此可以为功率 MOSFET 使用较小的晶体管。

### 1.1.1.3 三级：NFET、升压转换器和分立式实现的保护及诊断功能

在最终分立式实现中，有一个 N 沟道 MOSFET 和一个类似于实现级别二的栅极驱动器，但此设计在 MOSFET 周围包含额外的电路以提供不同的保护。电感钳位通过输出端的外部 TVS 或者反激式二极管实现。电流限制及电流检测均通过检测电阻器和放大器实现。电流限制可以通过 MCU ADC 来实现（可根据可编程阈值测量电流），也可以通过具有输出的比较器用 EN 信号进行 OR 运算来控制 EN 引脚。通过在导通 FET 附近放置温度检测 IC 或 BJT，可以实现过热保护。

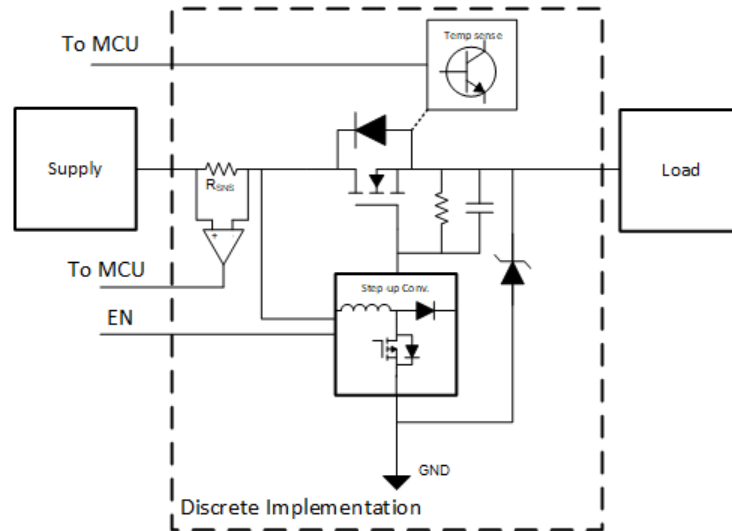


图 1-4. 三级分立式实现：NFET、升压转换器及分立式实现的保护

虽然分立式设计是可行的，但所有物理元件的成本和尺寸明显超过了集成式设计的成本和尺寸。此外，由于设计比集成电路需要更多的工程工作，因此工程成本也更高。

### 1.1.2 与负载开关的比较

TI 的负载开关和高侧开关都是集成式高侧电源开关集成电路 (IC)，用于将电压源连接到电气负载。两者都具有集成 MOSFET 及电荷泵。由于基本概念是相同的，因此其他制造商通常会互换使用这些名称。在 TI 的产品系列中，开关具有不同的名称，因为它们提供不同的基线规格和特性集，每个规格和特性集都是针对目标用例量身定制的。负载开关是低压开关，旨在驱动 3.3V、5V 或 12V 系统中的板载负载。板载负载处于更加受控的环境中，因此负载开关只需极少的保护特性即可满足系统要求。常见的保护特性包括压摆率控制、过热保护和快速输出放电。一些器件还可能提供短路保护、反向电流保护或电流监控等特性。

相比之下，高侧开关是一款受到全面保护且特性丰富的器件，针对在 12V、24V 或 48V 系统中驱动非板载负载进行了优化。器件必须承受非稳压电源轨上更严格的电压及电流瞬态。高侧开关设计用于驱动所有类型的电气负载，承受容性浪涌电流和来自电感负载的反冲。通常由非板载电源提供并驱动非板载负载，高侧开关需要具有更广泛的保护特性和诊断特性。第 3 节和第 4 节会更详细地讨论这些特性。表 1-2 比较了高侧开关和负载开关，列出了高侧开关的广泛保护和诊断特性。

表 1-2. 高侧开关及负载开关的比较

	高侧开关	负载开关
FET 配置	内部	内部
支持的典型输入电压	12V、24V、48V	3.3V、5V
典型输出电流能力	750mA-10A	200mA-15A
典型用例	非板载 负载驱动和配电	板载 负载驱动和配电
保护特性	可调节电流限制 过压保护* 反向电流阻断* 欠压锁定 (UVLO) 绝对热关断 相对热关断 GND 失效、电源失效保护 反向电池保护 电感式放电钳位	电流限制* 过压保护* 反向电流阻断* UVLO 热关断
其他特性	故障输出 模拟电流检测 开启和关闭状态下的开路负载和电池短路检测 过载和接地短路检测 UL 认证 1	快速输出放电 电源正常引脚 压摆率控制
接口	GPIO 或 SPI	GPIO
支持 AEC-Q100 认证	支持	支持

1. \*仅适用于选定器件。

### 1.1.3 与热插拔控制器及电子保险丝的比较 (集成热插拔)

在工业和企业市场中，*电子保险丝* 或 *集成热插拔* 这一名称通常描述了集成式 FET 输入功率保护 IC (例如 [TPS2663](#))。电子保险丝 (集成热插拔) 可在发生短路、过流、过压、欠压和过热事件等故障事件时提供电压和电流保护，否则可能会损坏下游负载。电子保险丝通常可以保护系统的输入，从而防止板载负载损坏。相比之下，高侧开关通常会执行输出电源保护，从而防止类似故障事件期间造成非板载负载损坏。

然而，从基本层面来看，两者都是高侧内部 FET 电源开关。例如，在 PLC 模拟输入模块中，工程师可以选择电子保险丝 (集成热插拔)，为现场变送器的输出电源端口提供误接线保护。高侧开关还可以在系统输入端提供简单的电流限制，尤其是在不考虑过压的情况下。当负载切换时，电子保险丝 (集成热插拔) 或高侧

开关可用于同一应用 (取决于电压和电流要求)，这些器件通常具有针对输入或输出保护量身定制的特性集。

用于工业应用的电子保险丝 (集成热插拔) 通常提供过压保护、用于反向电流阻断的集成背对背 FET 以及 UL 2367 认证。反向电流阻断还使电子保险丝 (集成热插拔) 和负载开关能够支持输入电源多路复用 (或者电源多路复用)。有关此主题的更多信息，请参阅 [使用负载开关和电子保险丝的电源多路复用](#)。要了解有关电子保险丝 (集成热插拔) 的更多信息，请参阅 [电子保险丝基础知识](#)。

为了实现输出电源保护，高侧开关集成了电感放电钳位、负载突降兼容性以及开路负载或断线检测等特性。[TPS274C65](#) 等一些高侧开关能够驱动外部 FET 来实现反向电流阻断。此特性对于 PLC 数字输出模块等应用非常有用，这些应用可能会在输出端口处遇到误接线情况。

高侧开关控制器和热插拔控制器等外部 FET 设计与相应集成式 FET 解决方案具有类似的关系。热插拔控制器旨在保护系统输入，在热插拔或热插拔事件期间提供电流限制和输入瞬态处理。热插拔控制器的主要用途是浪涌电流控制，因此总栅极驱动量通常较低。高侧开关控制器专为输出保护 (用于大电流非板载负载驱动) 和输入保护而设计，可为输出和输入提供强大的整体栅极驱动和瞬态处理能力。高侧开关控制器还具有双向功能。例如，具有双向电流能力的 [TPS1212-Q1](#) 在需要保护输入电源但偶尔允许电流流回电源 (例如为电池充电) 的应用中具有优势。高侧开关控制器与热插拔控制器之间的另一个区别在于过流响应。高侧开关控制器不会在热插拔控制器的典型限流方式下钳制电流。相反，它们提供断路器功能或模拟熔断型保险丝。汽车行业一种新兴的可编程保险丝曲线是  $I^2T$ ，其中 I 是电流、T 是时间。

汽车市场通常指具有  $I^2T$  保护的高侧开关或控制器，如 *电子保险丝* 或 *智能保险丝*。本文档将高侧开关或控制器的  $I^2T$  称为“智能电子保险丝高侧开关”，以与 TI 电子保险丝 (集成热插拔) 区分开来。第 4.5 节更深入地讨论了 TI 智能电子保险丝高侧开关的特性、保护和用例。

[表 1-3](#) 比较了高侧开关、高侧开关控制器、智能电子保险丝高侧开关、热插拔控制器和电子保险丝 (集成式热插拔)。[第 3.1.1 节](#) 进一步介绍了高侧开关及高侧开关控制器的不同过流行为。

表 1-3. 高侧开关、热插拔控制器及电子保险丝的比较 (集成热插拔)

特性 <sup>1</sup> 和配置	高侧开关	高侧开关控制器	智能电子保险丝高侧开关	电子保险丝 (集成热插拔)	热插拔控制器
FET 配置	内部	外部	内部或外部	内部	外部
反向电流阻断 (处于 ON 和 OFF 状态)	支持 <sup>2</sup>	不支持 <sup>3</sup>	不支持	支持 <sup>2</sup>	支持 <sup>2</sup>
输入反极性保护	不支持	支持	支持 <sup>4</sup>	支持 <sup>2</sup>	不支持
输出反极性保护	不支持	支持 <sup>2</sup>	支持 <sup>4</sup>	不支持	不支持
过流保护 (OCP) 行为 <sup>5</sup>	电流限制	断路器	稳压电流 (基于 I <sup>2</sup> T 保险丝特性)	断路器、电流限制或者功率限制	断路器、电流限制或者功率限制
过压保护	支持 <sup>2</sup>	支持 <sup>2</sup>	不支持	支持	支持
电感放电钳位	支持	不支持	支持	不支持	不支持
提供双向电流功能	不支持	支持 <sup>2,6</sup>	支持 <sup>4</sup>	支持 <sup>2,7</sup>	不支持
汽车负载突降兼容性	支持	支持	支持	不支持	不支持
UL 认证	支持 <sup>2</sup>	不支持	不支持	支持	不支持
接口	GPIO 或 SPI	GPIO	GPIO 或 SPI	GPIO 或 PMBus	GPIO 或 PMBus
AEC-Q100 认证	支持	支持	支持	支持 <sup>2</sup>	支持 <sup>2</sup>

1. 支持表示该产品系列通常可以提供某个特性。
2. 仅在部分器件中可用。
3. 在导通状态下，高侧开关控制器可以检测反向电流并向 MCU 发出运行信号，但它们没有集成保护方案
4. 仅适用于外部 FET 器件。
5. 电流限制功能将输出电流钳制在一个特定值；该值可以是可编程的或固定的。I<sup>2</sup>T 保护功能会根据特定电流时间曲线来关断输出电流。
6. 仅限双向电流监测
7. 稳态下的双向电力输送，支持 USB OTG 或 DRP 运行

#### 1.1.4 电机驱动器及栅极驱动器的比较

本文档特别重点介绍高侧开关和高侧开关控制器，它们集成了电荷泵以实现常开运行。这些电路不同于 TI 的半桥栅极驱动器产品系列，后者需要自举电路或外部偏置。此外，高侧开关和高侧开关控制器产品系列仅包含高侧通道，不可配置为半桥或低侧开关。高侧开关和控制器旨在驱动各种可能的负载（电阻负载、电容负载或电感负载）。虽然高侧开关可以单向驱动电机（如风扇），但它们不适用于需要更高级控制的电机，例如 BLDC 或步进电机。有关这些其他产品系列的更多信息，请参阅[选择合适的集成度来满足电机设计要求](#)或查看[栅极驱动器](#)或[电机驱动器](#)的概览页面。



### 1.1.5 总结

第 1.1 节概述了高侧开关和控制器与其他电源开关和类似 IC 的比较，并介绍了其术语和用例。表 1-4 总结了这些 IC 的用例和主要差异化特性。

**表 1-4. 电源开关 IC 的常见用例及主要优势**

IC 类型	最常见用例	主要差异
高侧开关	非板载负载驱动 输出电源保护 ( 12V 至 48V ) 12V 至 48V 配电	集成式电感放电钳位 过流保护 负载诊断
高侧开关控制器	高电流非板载负载驱动 高电流 12V - 48V 功率耗散 输出功率保护 (12V - 48V) 断路/电池断开	断路器过流保护 双向电流监测
电子保险丝和热交换控制器	输入电源保护 ( 5V 至 48V ) 热交换或热插拔	过流和过压保护
负载开关	板载负载驱动 (3.3V - 5V) 处理器的电源时序	快速输出放电 压摆率控制 紧凑型封装
电机驱动器	电机驱动与控制	集成电机控制电路 按电机类型 ( 有刷、无刷、步进等 ) 划分的专有特性
栅极驱动器	高频开关	需要自举电路或者外部偏置

## 1.2 常见汽车及工业标准

### 1.2.1 典型的汽车电压范围

直到 20 世纪 50 年代，大多数汽车都使用 6V 电压。但是，当发动机尺寸和功率增加时，发动机需要更大的功率才能启动，因此汽车行业采用 12V 作为标准电池电压。

从那时起，12V 广泛应用于汽车、卡车和两轮车，由此产生了丰富的电池、电子组件和导线选择生态系统，针对使用 12V 电源进行了优化。正是在这种系统电压下，TI 拥有品类丰富的高侧开关、高侧开关控制器和智能电子保险丝高侧开关产品系列。12V 产品系列的电源电压额定值最低，为 18V 标称最大值、28V 工作最大值以及 35V 负载突降。

为了优化布线和配电、降低汽车成本和重量并提高效率，汽车制造商正在采用 48V 电池和电源架构来应对高功率负载。此电压可以通过给定的线缆规格提供更大功率。由于 48V 是新的途径，电池技术和电源架构需要进一步的磨练和优化。

TI 提供适用于 48V 系统的高侧开关、高侧开关控制器及智能电子保险丝高侧开关产品系列。48V 产品系列的电源电压额定值至少为 58V 标称最大值和 65V 绝对最大值，而有些电源电压的绝对最大值高达 70V。瞬态电压额定值也可能更高，约为 80V。TI 的 48V 产品系列还可以用于汽车 24V 电池系统。图 1-5 总结了典型汽车系统的电压阈值。

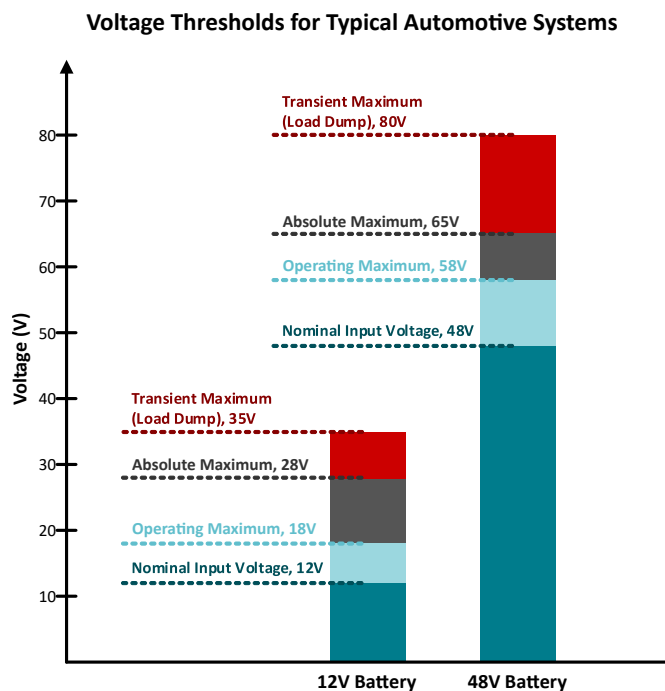


图 1-5. 典型汽车系统的电压阈值

### 1.2.2 典型工业电压范围

数十年来，工厂设备和工业控制系统一直采用 24V 电源，该电源可提供高输出功率和抗噪能力，并且负载瞬态引起的电源突降极小，同时能安全地接触裸露皮肤。随着时间的推移，该标准工作电压已演变成不同的标准。

所有 TI 目录（工业）高侧开关均支持 24V 工作电压，最低工作电压额定值为 36V（最大值）和 40V（绝对最大值）。早期的一些 TI 汽车高侧开关（例如 [TPS27S100](#)）的建议最大值为 40V、绝对最大值为 48V，因此这些器件优先用于工业 24V 系统。一些安全关键型工业系统实现了安全超低电压 (SELV) 电路，该电路需要 60V 的更高高侧开关电压容差。第 1.2.4 节更详细地讨论了 SELV 要求。图 1-6 汇总了典型工业自动化系统的电压阈值。

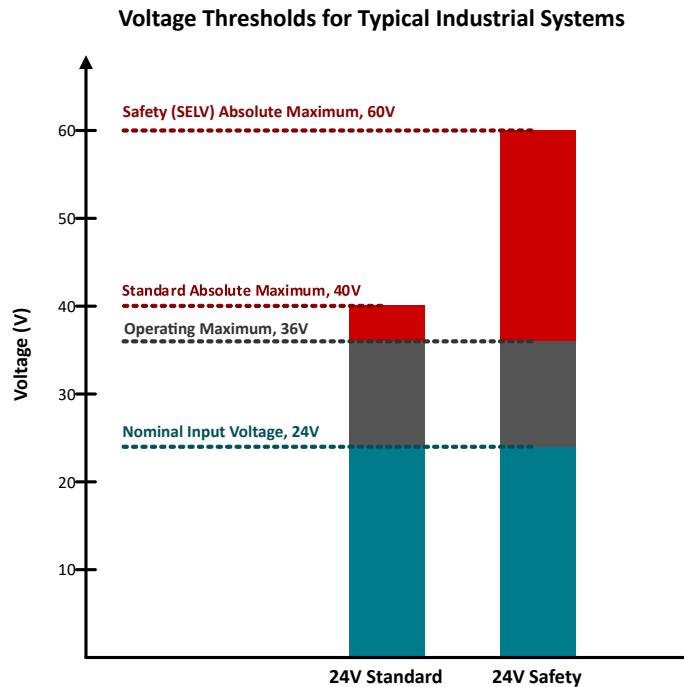


图 1-6. 典型工业系统的电压阈值

### 1.2.3 汽车资质认证及标准

汽车电子委员会的 AEC-Q100 认证是一套全面的质量要求和应力测试，用于验证集成电路是否可以在汽车应用的整个生命周期内可靠地运行。这些测试包括引线键合应力、ESD 抗扰度、闩锁效应抑制、非易失性存储器功能、故障及早期故障注意事项、短路可靠性等。此外，AEC-Q100 还设定了标准化的工作温度范围、所需的质量文档、器件表征和测试指南，以更大限度地提高质量控制。所有 TI 汽车级器件均符合 AEC-Q100 标准。

国际标准化组织 (ISO) ISO7637 标准描述了汽车系统中常见的传导电源和输出瞬变，并提供了背景和测试程序来评估 IC 对这些瞬变的稳健性。如果 IC 无法承受这些脉冲所需的能量耗散水平，则必须在应用级别实施外部保护。TI 的汽车类高侧开关符合 ISO7637-2 脉冲容差的要求。

ISO16750 标准详细说明了对于汽车电气、机械、气候和化学系统的环境应力。例如，ISO16750-2 (用于电气系统和负载) 包括一项称为负载突降的测试，当电池停止为负载供电或在交流发电机仍在为电池充电期间电池断开连接时，会发生长电压瞬变。TI 的所有汽车类高侧开关、控制器及智能电子保险丝高侧开关都满足相应电压域的负载突降要求。

另一个汽车 ISO 标准是 ISO26262，其中详细介绍了汽车功能安全。该标准定义了一种严格的方法，专注于更大限度地减少危害人类生命的频率和严重程度。有关此主题的更多信息，请访问 TI 的[功能安全主页](#)。

其他标准包括国际汽车工作队 (IATF) IATF16949，该标准对汽车系统和元件使用的评估和认证方法进行了标准化；以及国际电工委员会 (IEC) 的 CISPR25 (一种广泛的车辆 EMI 要求，其中详细说明了传导发射和抗扰度的测试限制)。

### 1.2.4 工业资质及标准

IEC61000-4 标准组测试 IC 针对不同电压瞬态事件的抗扰度，这些事件包括静电放电 (ESD)(IEC61000-4-2)、电快速瞬变 (EFT) (IEC61000-4-4) 和浪涌 (IEC61000-4-5)。许多 TI 目录高侧开关都根据 IEC61000-4 进行了测试。

IEC 还定义了安全关键型工厂系统中常用的 SELV 系统。SELV 电源的一个标准是：如果失败，输出不得超过 60V DC。SELV 验证人类不会接触到高压导体，高电压接触点没有电流返回路径，也没有带电导体连接到大地。

TPS281C30 和 TPS281C100 的额定绝对最大电压大于 60V，用于安全 PLC 等 SELV 系统。

Underwriters Laboratories UL2637 是用于限流应用的开关认证，表明这些 IC 可以在保护下游元件的同时可靠运行。

TI 的 [TPS272C45](#) 通过了 [UL2637](#) 认证，有助于简化设计周期并缩短产品上市时间。

与汽车应用类似，工业应用也有 EMI 标准。一种常见的标准是 [CISPR32](#)，这是一种详细说明辐射和传导发射及抗扰度的测试限值的广泛标准。

## 2 高侧开关及控制器的架构和应用差异

### 2.1 架构差异

高侧开关和高侧开关控制器之间的主要区别在于主 FET 的集成 (如图 1-1 所示)。这种根本区别在于,高侧开关能够以低成本和解决方案尺寸进行优化,而高侧开关控制器在可配置性和极高电流驱动方面表现出色。第 2.1 节从表 2-1 中的摘要开始,更详细地介绍了这些差异。

表 2-1. 高侧开关及控制器架构差异

	高侧开关	高侧开关控制器
FET 配置	内部	外部
栅极控制	内部	外部 <sup>1</sup>
最大电流	受内部限制	受外部 FET 选择的限制
过流行为	限流	断路器
当前检测实现	全内部,外部设置电阻器除外	外部电流检测分流电阻器或者 MOSFET 导通电阻检测
方向性	单向	双向 <sup>2</sup>
电感放电	集成型电感钳位	无
FET 温度检测	集成监测	远程监控 (使用 BJT 或者 NTC)

1. 外部栅极控制可实现任意压摆率操作、快速脉宽调制 (PWM) 以及并联驱动多个 MOSFET 栅极。
2. 背对背 MOSFET 驱动器可以实现反向电流阻断、双向电流监测以及对大电容进行预充电。

在高侧开关中,由于 FET 是内部的,栅极和栅极驱动器也是完全内部的,可实现卓越的性能和可靠性。因此,高侧开关的导通和关断压摆率由内部电路决定。在高侧开关控制器中,栅极驱动器输出本质上是外露的,允许任意转换率操作、快速脉宽调制 (PWM) 和并联驱动多个 MOSFET 栅极。

由于高侧开关的最大电流在很大程度上由内部 FET 决定,因此电流限制和电流检测架构可以完全是内部架构,但外部设置的电阻除外。这使得可编程性相对较高,同时保持整体设计的简单性。相比之下,高侧开关控制器是针对任意电流驱动而开发的,并且本身不传导负载电流,因此电流限制和电流检测架构也必须可任意编程。这可通过两种方式实现:使用电流检测分流电阻器或者 MOSFET 导通电阻检测。检测电流检测电阻器或者 MOSFET 压降,然后将其转换为电流,再通过外部电阻器将其转换回电压。接着将该电压与电流限制的内部阈值进行比较,并由外部 ADC 读取以进行电流检测。这提供了多个灵活性点:可以选择电流检测电阻器以更大限度地减小输入压降和成本,同时而可以选择值更高的限流电阻器以实现精确的阈值控制,从而能够在 1A 至 kA 以下的范围内准确检测电流。

高侧开关旨在为下游负载单向供电。相比之下,高侧开关控制器可以控制背对背 MOSFET,从而实现反向电流阻断、双向电流控制和大输出电容预充电等重要功能。高侧开关不能仅通过一个电源 FET 阻断反向电流,但高侧开关可以通过恒流电容充电特性来为大型负载电容充电。(注意:TPS274C65 具备用于外部阻断 FET 的集成驱动器)。此外,高侧开关控制器无法像高侧开关那样固有地对电感负载放电或调节恒定电流。

由于 FET 为内部 FET,因此可以轻松监测高侧开关的 FET 和控制器温度。高侧开关控制器必须通过 BJT 或者负温度系数 (NTC) 热敏电阻远程监测 FET 温度。

## 2.2 应用差异

高侧开关及控制器通常用于为具有高侧驱动器模块非板载负载或非本地负载供电。高侧开关控制器也可以用作输入保护器件。第 2.2 节回顾了负载驱动和输入保护应用中决定电源开关器件时要考虑的因素，首先在表 2-2 中进行了总结。

**表 2-2. 高侧开关及控制器的应用差异**

	典型应用	主要差异
高侧开关	<15A 负载驱动	集成式 FET 可调节电流限制 OCP 负载诊断
高侧开关控制器	>15A 负载驱动 ( 或具有高浪涌电流需求的较低电流负载 ) 电池断开 直流/直流转换器断开	外部 FET 断路器 OCP 背对背 FET 驱动能力 双向电流监测 反极性保护

### 2.2.1 负载驱动

对于非板载负载驱动，高侧开关或高侧开关控制器之间的决策相当简单。这两个特性集的重叠程度都足够高，以至于决策是基于负载电流的。如果可能，建议使用高侧开关以实现最简单的设计。此外，集成式 FET 设计通常比外部 FET 解决方案具有更高的成本竞争力。但在很多情况下，例如在汽车配电盒中，负载需要的标称电流对于任何集成解决方案而言都过高。在这种情况下，与并联 FET 情况一样，高侧开关控制器更合适。在一些边缘情况下，标称负载电流可通过高侧开关控制，但浪涌需求过高。在这些情况下，高侧开关控制器也是一个不错的选择。

### 2.2.2 输入保护及电路中断

高侧开关控制器特有的两个功能是输入保护及电路中断。为了实现高电流输入保护，高侧开关控制器位于直流/直流转换器或电池的输出端。在这种情况下，高侧开关控制器可提供浪涌电流控制和短路保护（正向）或反向电流阻断，具体取决于配置。在短路保护配置中，过流响应类型为闩锁，需要 MCU 干预才能重新开启器件。如果系统需要反向电流阻断和反向短路保护功能，可结合使用高侧开关控制器和理想二极管控制器。或者，使用集成了这两种特性的理想二极管控制器。理想二极管控制器和高侧开关控制器都是汽车输入电源保护的常见选择，因为它们具有高电流能力并通过汽车 AEC-Q100 认证。设计用于输入保护的器件（例如理想二极管控制器及热插拔控制器）优先考虑更强的灌电流以实现快速关断。高侧开关控制器通常同时具有强大的拉电流和强大的灌电流，因此可用于提供输入保护和输出保护。对于较低电流输入保护应用，尤其是在工业或企业应用中，由于电子保险丝尺寸紧凑和功率密度优势，集成式热插拔器件是更常见的解决方案。

表 2-3 总结了高侧开关控制器和理想二极管控制器之间的主要差异。要了解有关理想二极管控制器的更多信息，请参阅[理想二极管基础知识](#)。与输入保护功能类似，高侧开关控制器也可以执行断路器功能。对于直流/直流断路器应用、可以在直流/直流转换器两侧使用两个背对背 FET 高侧开关控制器。在此配置中，高侧开关控制器可控制浪涌电流，管理过压条件并阻断直流/直流转换器的上行和下行电流。

由于此应用的双向性质，具有双向电流监测和基于 I<sup>2</sup>T 的短路保护功能的高侧开关控制器可提供出色的保护。对于电池管理系统 (BMS) 中的断路器功能，可以使用正极电池轨上的高侧开关控制器。具有背对背 FET 的高侧开关控制器可以独立控制充电和放电路径。此外，在这种 BMS 断开开关配置中，高侧开关控制器提供低静态电流、反极性保护（输入和输出）以及电流感应功能。汽车类直流/直流和 BMS 断路器应用通常具有高电流（约 150A，峰值为 1kA），因此需要外部 FET 设计。

**表 2-3. 高侧开关控制器与理想二极管控制器比较**

	高侧开关控制器	理想二极管控制器
FET 配置	外部 ( 单个或背对背 )	外部 ( 单个或背对背 )
典型拉电流	0.5A - 3.7A	0.011A - 0.06A
典型灌电流	2A - 4A	1.5A - 2.7A
反向电流阻断 ( 处于 ON 和 OFF 状态 )	不支持 <sup>1</sup>	支持
输入反极性保护	支持	支持



**表 2-3. 高侧开关控制器与理想二极管控制器比较 (续)**

	高侧开关控制器	理想二极管控制器
输出反极性保护	支持 <sup>2</sup>	不支持
OCP 行为 <sup>3</sup>	断路器	断路器 <sup>2</sup>
过压保护	支持 <sup>2</sup>	支持 <sup>2</sup>
汽车负载突降兼容性	支持	支持

1. 在导通状态下、高侧开关控制器可以检测反向电流并向 MCU 发出运行信号，但它们没有集成保护方案。
2. 仅在部分器件中可用
3. 电流限制功能将输出电流钳制在一个特定值；该值可以是可编程的或固定的。I<sup>2</sup>T 保护功能会根据特定电流时间曲线来关断输出电流

### 2.3 摘要及产品系列选择矩阵

从 TI 的高侧开关和控制器产品系列中进行选择，重点关注该器件的主要应用。对于中低电流负载驱动和配电，请参考高度集成的高侧开关。对于高电流负载驱动和断开开关，利用外部 FET 高侧开关控制器的灵活性。在试图仿真传统的熔断型保险丝或优化线束时，可以利用智能电子保险丝高侧开关集成的基于 I<sup>2</sup>T 的过流保护功能。

如果不确定使用高侧开关或控制器与其他电源开关产品系列的优劣，请考虑系统设计及以下四个关键因素：

1. **电源开关的位置** (输出电源保护或输入电源保护)
2. **系统输入电压** (例如，12V 或 48V 电池)
3. **所需的过流行为** (用以限制电流，断开电路或模拟熔断型保险丝)
4. **输出电流** (确定内部或者外部 FET)

确定电源开关的位置和所需的过流行为 (如果有) 会集中选择具有理想特性集的产品系列。所需的输出电流决定了如何选择内部或者外部 FET 产品系列。对于输出电流，这并不是固定的阈值，因此需要使用内部与外部 FET 产品。TI 定期发布新器件，因此请查看产品选型表，了解给定时间的最大可用输出电流。如果不够高，请考虑使用外部 FET 器件。最后，考虑系统输入电压会减少通常支持该电压范围的产品系列的选择。与输出电流类似，这可能会随着 TI 发布新产品而变化，因此请查看产品选型表以了解可用的最新选项。

**表 2-4** 直观地将此方法总结为产品系列选择矩阵。选择产品系列后，使用 TI.com 上的产品选择表筛选参数、特性、封装类型和封装尺寸，以查找特定器件。

表 2-4. 高侧电源开关的产品系列选择表

电压	输出保护			输入保护				
	OCP : 电流限制	OCP : 断路器	OCP : I <sup>2</sup> T	OCP : 电流限制	OCP : 断路器	OCP + 反向电流 阻断	反向电流阻断	反向电流监测
3V - 5V	负载开关	X	X	电子保险丝 (集成热插拔)	电子保险丝 (集 成热插拔)	电子保险丝 (集 成热插拔)	理想二极管/ ORing 控制器	X
12V	高侧开关	高侧开关控制 器	内部 FET : 智能电子保险 丝高侧开关 外部 FET : 智能电子保险 丝高侧开关	内部 FET : 电子保险丝 (集成热插 拔) 外部 FET : 热插拔控制器	内部 FET : 电子保险丝 (集 成热插拔) 外部 FET : 热插拔控制器或 者高侧开关控制 器	内部 FET : 电子保险丝 (集 成热插拔) 外部 FET : 热插拔控制器或 者选择理想二极 管控制器		高侧开关控制 器
24V				电子保险丝 (集成热插 拔)		内部 FET : 电子保险丝 (集 成热插拔) 外部 FET : 选择理想二极 管控制器		
48V								



### 3 高侧开关及控制器的核心特性

高侧开关及控制器的典型特性分为两类：保护特性和诊断特性。保护特性会在故障条件下发挥作用。相比之下，诊断特性仅识别和报告故障状况。由于这两种类型的特性都以负载和故障状态为中心，因此检测和保护机制集成在一起。第 3 节探讨了大多数 TI 高侧开关和控制器中常见的核心保护和诊断特性（在表 3-1 中进行了总结）。

表 3-1. 高侧开关及控制器的核心特性

保护特性	诊断特性
过流保护 (OCP)	电流检测
热关断 (绝对和相对)	电压检测
欠压锁定 (UVLO)	开路负载检测
过压锁定 (OVLO)	电池短路检测
电感负载处理	结温检测
反极性保护	

#### 3.1 保护特性

##### 3.1.1 过流保护

高侧开关中最典型的过流保护形式为限流响应。集成式 MOSFET 可以在故障情况下将输出电流调制到安全水平。传统的高侧开关具有内部固定的电流限值，该限值设置得非常高，可满足广泛的负载要求。TI 的许多高侧开关提供的可调节电流限制范围低于传统固定电流限制。在短路或部分负载短路（软短路）期间，较低的电流限值设置可以大幅降低故障能量和输出电流。通过降低故障能量和电流，整个系统通过以下方面得到改善：

- 减小尺寸和成本（在载流元件中，如 PCB 布线和模块连接器）
- 在短路事件期间对于电源（VS 引脚）的干扰更小
- 解决一个或者多个通道中过载电流问题所需的电源额外预算较少
- 为下游负载提供更好保护

在大多数 TI 高侧开关中，电流限制可通过外部电阻器来调节。在具有遥测功能的器件中，此电流限制是可编程的。有关本主题的进一步解读，请参阅[智能电源开关的可调节电流限制](#)。

在最近几代高侧开关中，还有其他限制电流的方法。虽然在设定水平的钳位电流仍然是 TI 产品系列的主要响应，但存在钳位变化，该情况下会动态控制电流限制，以限制器件控制器与 FET 温度之间的差值，并防止器件进入相对热关断状态。这种动态钳位特性称为热调节，使器件能够为更大的电容负载充电，并在关断之前为相同的电容负载充电更长时间。

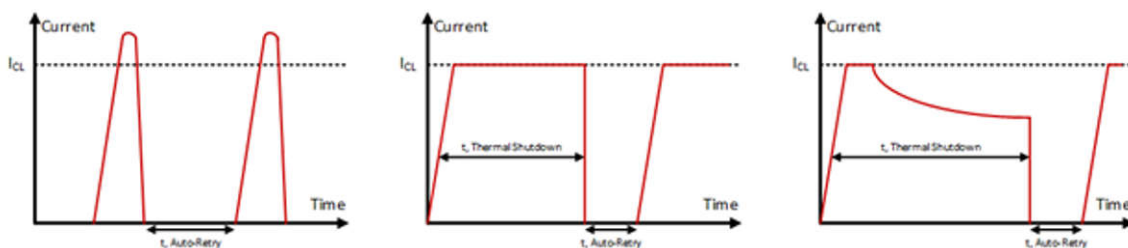


图 3-1. 三种不同电流限制响应的电流与时间关系图：立即关断（断路器）（左）、电流钳位（中间）和具有热调节功能的电流钳位（右）

##### 3.1.2 热关断

###### 3.1.2.1 绝对热关断

高侧开关会出现过热情况的原因如下：持续过流、电流钳位导致的高功率耗散、环境因素、附近元件导致的 PCB 发热等。为了防止在过热事件期间造成永久性损坏，高侧开关和高侧开关控制器必须能够检测到过热情况，并在发生过热情况时将主 FET 关断。高侧开关和控制器通过两种不同的方式来实现此目的。

高侧开关在器件控制器上具有一个温度传感器。当控制器温度达到某个水平（通常高于 150°C）时，器件会检测到该温度并在微秒内关断 FET。反复发生热关断不会损害 TI 高侧开关的可靠性。

高侧开关控制器不需要监控其温度，因为器件本身不会耗散大量功率。相反，高侧开关控制器需要监测外部 FET 的温度，这是通过放置在 FET 旁边的 BJT 或 NTC 热敏电阻实现的。同样，如果 FET 温度上升到 150°C 以上，器件将立即关断。

### 3.1.2.2 相对热关断

对于高侧开关，由于热量从 FET 传递到控制器需要一段时间，TI 高侧开关实现了第二种热关断类型：相对热关断。此实现方案在 FET 上使用第二个温度传感器，并将 FET 温度与控制器温度进行比较。如果温差超过特定量（通常在 60°C 附近），器件会关断并在温差减小时重新启用。相对热关断仅在负载电流增加非常快且很大时发生，因此相对热关断通过电流限制作用来提供接地短路保护。

### 3.1.2.3 欠压锁定及过压锁定 (UVLO 和 OVLO)

大多数现代集成电路（包括 TI 高侧开关）都包含一个欠压锁定电路，以确保器件在低于特定输入电压时断电至已知的安全状态。TI 高侧开关具有低 UVLO 阈值，可在汽车冷启动等常见行业事件期间实现高性能。

一些 TI 高侧开关和控制器还包含过压锁定功能，当输入电压高于特定值（例如 TPS281C30 和 TPS4811-Q1）时，输出将关闭。OVLO 要求通常通过工业 SELV 标准和汽车 48V 工作范围来决定。

### 3.1.2.4 感应钳位

施加外部电压时，电感器可抵抗电流变化。驱动电感负载会产生两种重要的行为：导通期间的电流压摆率较慢，以及在电感关断期间输出下拉。在导通期间，较慢的电流压摆率允许器件有更多时间检测过流事件，因此电感不会出现问题。

但是，如果在驱动电感负载的同时关断高侧开关，电感器将阻止电流减小。理想情况下，当高侧开关断开时，电流将瞬间变为 0A。利用公式 1，我们可以评估发生这种情况时电感器电压是多少。

$$V_{inductor} = L_{inductor} \times \frac{di}{dt}_{inductor} \quad (1)$$

当电流立即从非零值降至 0 时， $di/dt_{inductor}$  为负无穷大，因此  $V_{inductor}$  为负无穷大。由于接地端是稳定基准，因此高侧开关的输出节点将被拉至负无穷大电压，导致元件和系统损坏。实际上，所有节点都具有一定的寄生电容。良好的模拟设计决定了使用去耦电容器和 ESD 电容器，但这些电容很小，只能将电流压摆率降低一小部分。因此，当电感负载由高侧开关关断时，负载的正节点会快速被拉至一个高负值。为了保护高侧开关和周围电路，TI 高侧开关实现了一种称为 VDS 钳位的动态漏源钳位。当 FET 源达到一定的低于漏极的电压时（通常约为 40V），该电路会部分导通 FET，将漏源电压限制为 VDS 钳位电压，并快速对存储在电感器中的能量进行放电。

VDS 钳位特性提供了一种巧妙的集成设计，能够快速耗散电感负载中的电感能量。但是，当 VDS 钳位激活时，会导致 FET 中出现高功率耗散，如果激活过长，可能会损坏器件，因此 VDS 钳位只能安全地耗散一定量的电感能量。如果负载的最大电感能量超过高侧开关的放电额定值，则必须使用反激二极管或 TVS 钳位等外部设计。

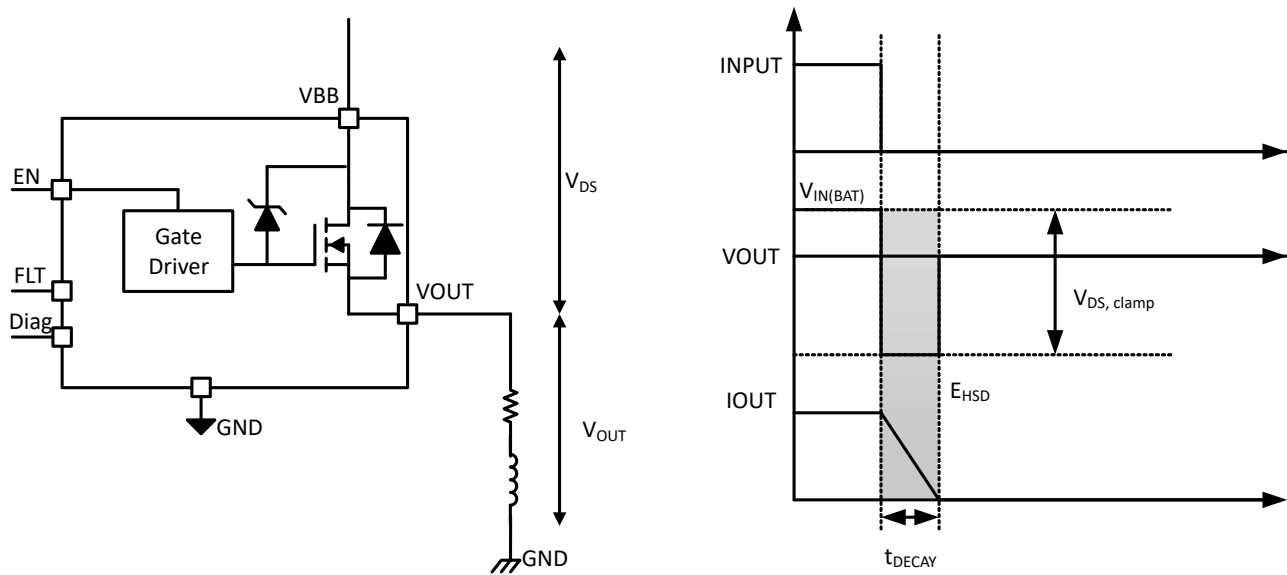


图 3-2. 驱动电感负载的高侧开关的简化版原理图 (左) 及时序图 (右)

### 3.1.3 反极性保护

系统的输入或输出处可能会出现反极性条件。为了实现输入反极性保护，PFET、分立式二极管或输入保护 IC 与系统输入串联。当输入端发生反极性事件（例如汽车电池接线错误时），输入阻断器件会变为高阻抗并防止所有电流流动，从而保护电路板上的器件。建议使用 TI 的反极性保护器（如 LM74500-Q1）或理想二极管控制器（如 LM74700-Q1）来实现输入反极性保护。TI 高侧开关及控制器实现了输出反极性保护特性。

#### 3.1.3.1 接地网络

除了输入反极性保护之外，接地网络是保护高侧开关免受输入反极性条件影响的另一种方法。接地网络并联利用一个电阻器和二极管将高侧开关 IC 接地端连接到系统接地端。这会在反极性条件下限制流入器件 GND 引脚的电流，但在输入正确连接后允许正常运行。

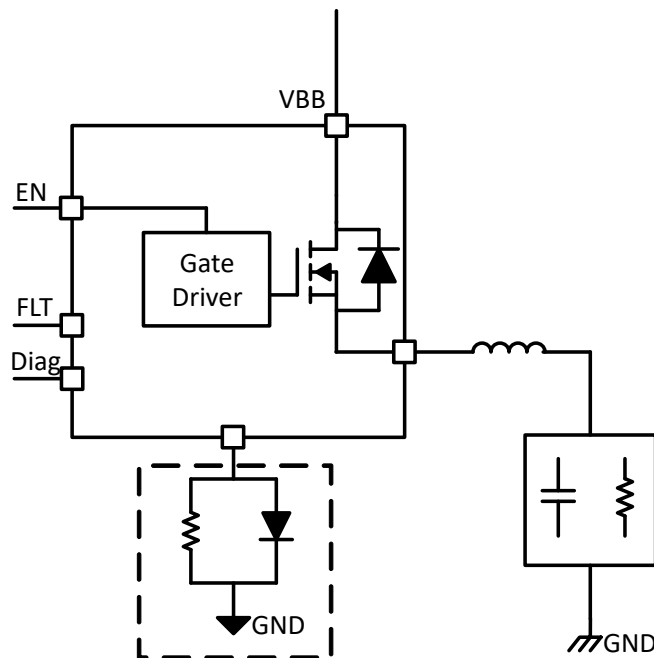


图 3-3. 带接地网络的高侧开关的简化原理图

该接地网络仅保护器件的 GND 引脚。由于 FET 源极最终连接到系统接地，而不是 IC GND，因此在反极性条件下，电流可以从 FET 源极流向漏极。该电流受到负载的限制。为了防止电流流过 FET 体二极管从而导致器件高功率耗散，FET 在反极性条件下导通。可在多个高侧开关之间共享接地网络元件。

### 3.1.3.2 高侧开关控制器中的反极性 & 反向电流保护

与高侧开关不同，一些高侧开关控制器包含第二个栅极驱动器。第二个栅极驱动器的主要用途之一是控制背对背 FET，该 FET 可提供反向电流阻断和反极性保护。相比之下，集成的高压侧开关会打开传输 FET 以耗散功率进行保护。借助背对背 FET，高侧开关控制器可在关断状态下阻断反向电流、多路复用电源，并可用于需要双向瞬态的直流/直流转换器的输入或输出。凭借这一功能，高侧开关控制器的用例比高侧开关更广泛。

此外，高侧开关控制器还集成了反极性保护功能，无需外部元件即可在反向输入极性条件下保护 IC。

## 3.2 诊断功能

### 3.2.1 模拟电流感应

高侧开关和控制器最重要的诊断特性之一是感应、放大和报告电流的能力。在高侧开关中，模拟电流检测功能使用电流镜来提供  $1/K_{SNS}$  的负载电流，其中  $K_{SNS}$  是输出电流与检测电流的比值。该电流通过检测电阻 ( $R_{SNS}$ ) 从检测引脚 ( $SNS$  或  $CS$ ) 驱动至地，从而产生可由 ADC 读取的模拟电压。可以对  $R_{SNS}$  电阻器进行一定的操作，以尽可能地扩大可读取的电流范围。对于许多高侧开关， $SNS$  引脚上也会以逻辑高电平的形式报告故障。对于这些器件， $R_{SNS}$  值的上限必须为逻辑高电平输出 (称为余量电压) 留出裕度。

对于高侧开关控制器，电流以类似的方式通过模拟电流监测输出 ( $IMON$ ) 进行测量和报告。与高侧开关不同的是，高侧开关控制器从与导通 FET 串联的外部电流检测电阻 ( $R_{SNS}$ ) 读取数据。该电阻器的端子用作比较器的输入端，该比较器将电流调制到另一个外部监测电阻器 ( $R_{IMON}$ ) 上。通过读取  $R_{IMON}$  上的电压，外部 ADC 可以确定负载电流。此电流监测方案的电压范围在上端受到  $IMON$  引脚上的内部钳位限制。在下端，它受源极电压 ( $VS$ ) 的限制。

一些高侧开关控制器的另一个有趣特性是能够测量双向电流。这在具有两个电源的应用中十分有用。例如，在某些电动汽车中，有一个直流/直流转换器会将电压从高压电池降低到为电子产品或辅助电池供电。辅助蓄电池电源轨上的开关将看到双向电流流动，因为它会向电力负载充电和放电。高侧开关控制器可以指示  $R_{IMON}$  上的电流幅度，并通过  $I\_DIR$  引脚上的高电平或低电平信号报告该电流的方向。

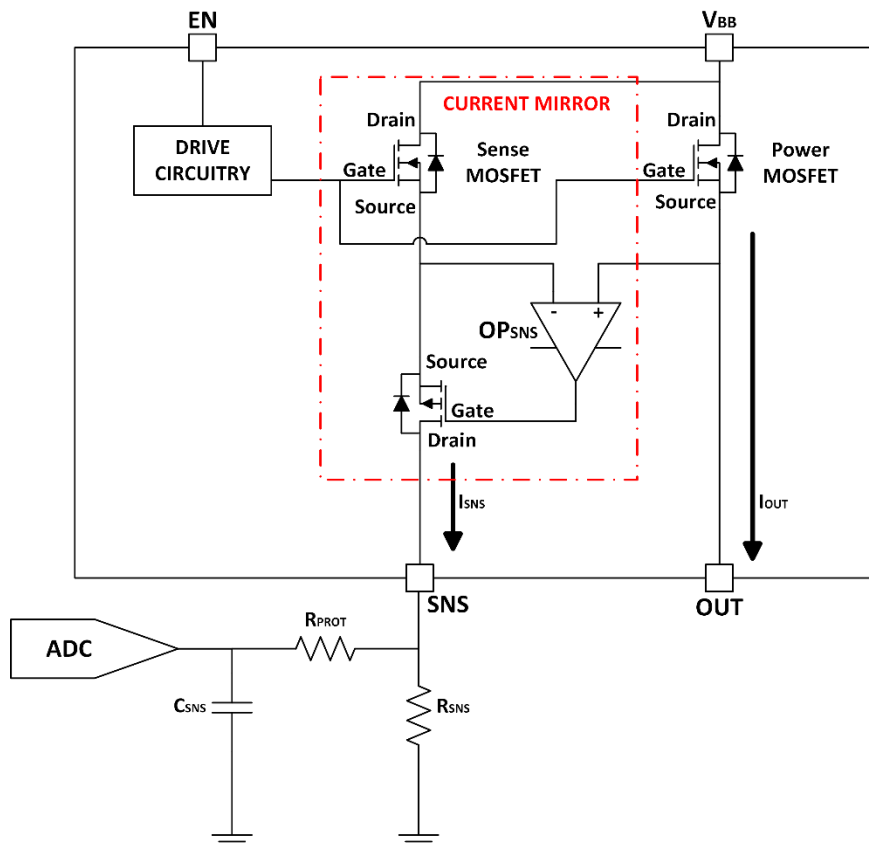


图 3-4. 基本高侧开关电流检测实现

### 3.2.2 开路负载和电池短路检测

驱动非板载负载时，断线、焊料间隙或开关和负载 (或负载和接地) 之间传导路径中的任何其他物理断开可能会导致开路负载故障。为了通过系统可靠性测试，这些故障必须以非常低的速率发生。尽管如此，高侧开关通常会在发生开路负载时检测这些负载。电池短路是当开关的输入及开关的输出短接在一起时发生的故障。开路负载和电池短路故障在故障发生时表现出相同的特征，因此检测和报告机制是相同的。

为了在关断状态下检测开路负载或电池短路，会激活弱漏源上拉电阻器并测量漏源电压。如果此差值小于器件的开路负载检测阈值，则实际上是相同的，器件会确定输出未放电至接地端。因此，开关的端子会短路（因为发生电池短路故障），或者导通路径中存在一些断路。然后 FLT 引脚变为低电平，SNS 通过逻辑高电平报告此情况。要在导通状态下检测这些故障，需要提供一些额外的智能信息。当开关接通时会发生这些故障，但电流很少或没有电流流过开关。为了检测这一点，MCU 将 ADC 报告的低检测电流与正常条件下预期的电流电平进行比较。然后，通过交叉检查 EN 信号是否为高电平，MCU 可以确认存在开路负载或电池短路。

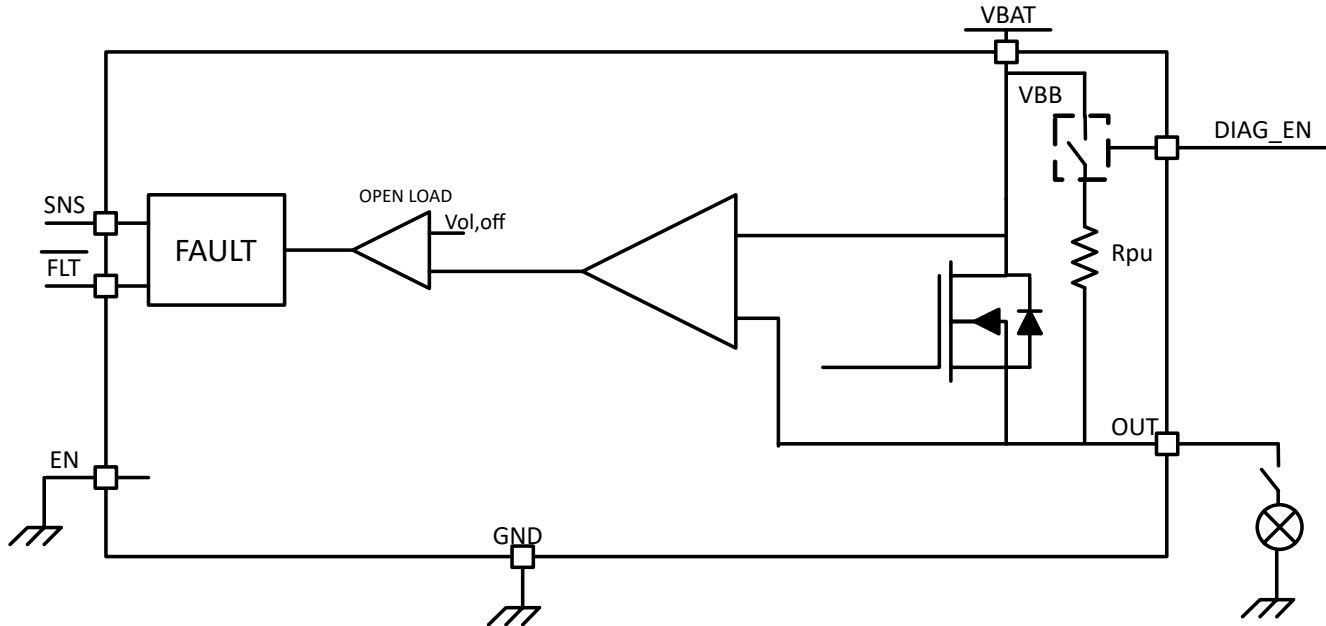


图 3-5. 高侧开关内集成的典型开路负载检测方案

借助集成式 ADC 和上拉网络，SPI 控制的高侧开关和智能电子保险丝高侧开关能够在导通和关断状态下检测这些故障并区分它们。

### 3.2.3 结温检测

一些标准高侧开关器件及智能电子保险丝高侧开关可以读取集成式 FET 的结温。在具有 GPIO 接口的器件中，这是通过内部温度检测电路实现的，该电路多路复用到 SNS 引脚上并由 ADC 读取。对于 SPI 高侧开关，集成式 ADC 通过 SPI 接口发送温度信息。

对于具有 GPIO 接口的高侧开关控制器，功率 FET 附近的温度检测引脚通过 NTC 热敏电阻读取电压。一旦此电压达到足够高的水平，就可以将该电压读取为 FET 温度的模拟值。控制器支持对温度阈值进行编程，如果超过该阈值，则会向控制器发出信号，要求关闭 FET 以保护控制器。

### 3.2.4 输入和输出电压检测

输入和输出电压检测是高侧开关和控制器的一项特性。此特性只会读取 FET 的漏极和源极电压，以提供保护并传输诊断数据。在高侧开关控制器中，VDS 检测是读取电流的两种方法之一，因为电流检测引脚可连接到 FET 的漏极和源极，而不是连接到电流检测电阻器的端子。对于高侧开关，内部检测电流可以专门读取电源电压，并将该值输出到检测引脚以供 MCU ADC 读取。

在 SPI 控制的高侧开关和智能电子保险丝高侧开关中，可以单独读取输入和输出电压，并将其存储在可读寄存器中，以供 MCU 提取。除了内部 ADC 提取的电流和温度数据之外，可以在任何给定的时间采集 FET 状态的完整热像图和电气图。



## 4 专有特性

除了典型的保护和诊断特性外，部分高侧开关和控制器还具有专有特性。这些专有特性通常可满足器件在特定终端应用中的需求，例如智能电子保险丝高侧开关具有为线束保护设计的特性。第 4 节更详细地探讨了这些专有特性（总结如下）。

- 电容充电特性
- 串行通信和相应特性
- 增强的 EFT
- 反向电流阻断
- LED 驱动
- 集成看门狗计时器
- 循环冗余校验 (CRC)
- 稳态可编程 PWM 开关
- 可编程时间电流功能 ( $I^2T$ )
- 低功耗模式 (LPM)
- 下电上电后的存储器保留 (NVM 或 EEPROM)

### 4.1 电容充电特性

标准高侧开关的容性负载充电通过钳位电流限制来实现。如前所述，可以对某些器件中的电流限制进行编程，以将过流保持在稳定水平，直到负载充电或器件达到热限值。该方案的主要目标是避免容性负载初始化附带的较大且可能具有破坏性的浪涌电流。在高侧开关控制器中，可通过与主功率 FET 并联的较小次级 FET 或在主 FET 栅极上设置 RC 延迟来实现大电容充电。次级路径用作基于无源电阻的预充电方案。

SPI 控制的高侧开关（以及选择 GPIO 控制的器件，如 TPS272C45）采用可配置的双级电流限制方法。第一级（即浪涌级）可以编程长度及电流限制。该级中的电流限制会钳制电流以控制浪涌。数据表会指定此阶段可用的不同时间段和电流限制。第二级或稳态级具有浪涌级独立编程的电流限制。这种双级方案不只是可用于容性负载。也可针对具有独特浪涌曲线的任何负载（例如电机失速电流或灯泡）进行配置。SPI 接口控制器提供了线性充电方法，在这种方法中，可以通过主 FET 或次级 FET 的路径将电流钳制在特定电平。有两种型号可以供选择：一种是集成了次级路径的型号、另一种是通过引脚控制外部次级路径的型号。它们还提供 PWM 充电方法，其中主路径的栅极由占空比和频率可调的 PWM 信号触发。最后，还有一种基于短路保护的方法，在该方法中，主 FET 处于导通状态，直到触发短路保护。FET 会禁用以提供保护，并且在自动重试周期结束后，FET 会重新导通，直到再次触发短路保护。这会一直重复，直到容性负载充满电。

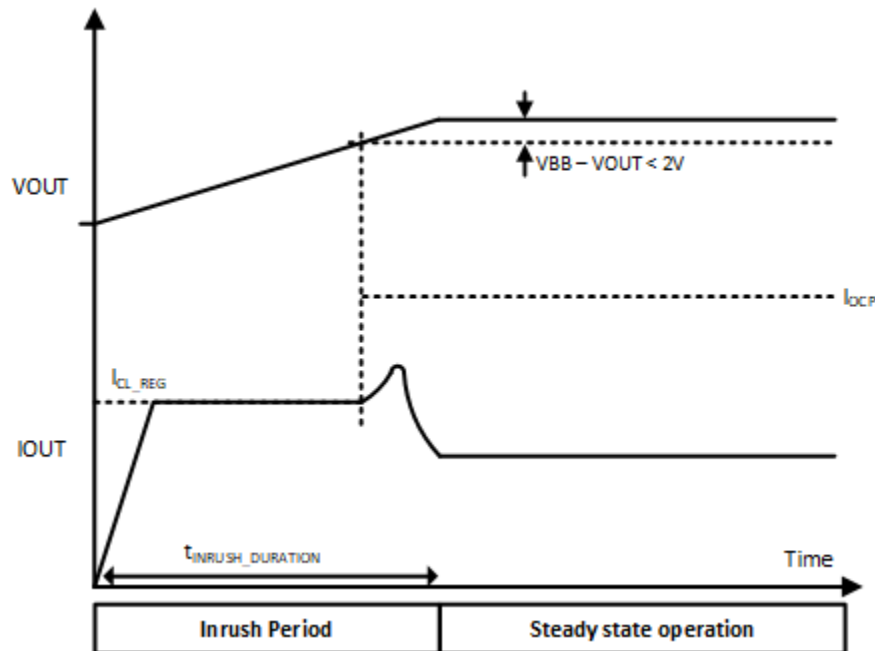


图 4-1. 时序图，显示了电容充电方案在浪涌和稳态期间的高侧开关行为

## 4.2 串行通信和相应特性

有两种控制高侧开关的方法：使用简单的 GPIO 引脚或使用串行通信协议，如串行外设接口 (SPI)。高侧开关中的 SPI 功能可实现更强的定制和控制能力，允许用户控制以下功能：

- 启用和禁用开关
- 启用和禁用诊断
- 选择和启用电压、电流及温度测量
- 管理故障
- 配置电流限制和浪涌电流时间
- 配置 I<sup>2</sup>T 保险丝曲线
- 配置低功耗及电容充电模式

高侧开关可以具有可寻址或菊花链 SPI 模式。使用菊花链 SPI 时，器件以串行方式连接，数据按顺序从一个器件传输到下一个器件。这种方法较慢，因为每次传输时都会引入延迟，但允许使用同一 SPI 总线控制更多单元。可寻址 SPI 允许以串行或并行方式连接器件。每个器件都具有唯一的地址，从而支持直接通信并消除了菊花链的级联延迟。

具有 SPI 的高侧开关通常还集成了模数转换器 (ADC)。集成式 ADC 允许高侧开关通过 SPI 将电流检测信息传输回 MCU，从而有助于简化系统中的电流检测。图 4-2 展示了 PLC 数字输出模块中这种情况的示例。在这种情况下，将电流检测电路、ADC 和 SPI 集成到 TPS274C65 中可以通过隔离栅传输电流检测数据，并由于布线发生在高侧开关内部，因此减少了 ADC 通道的路由。

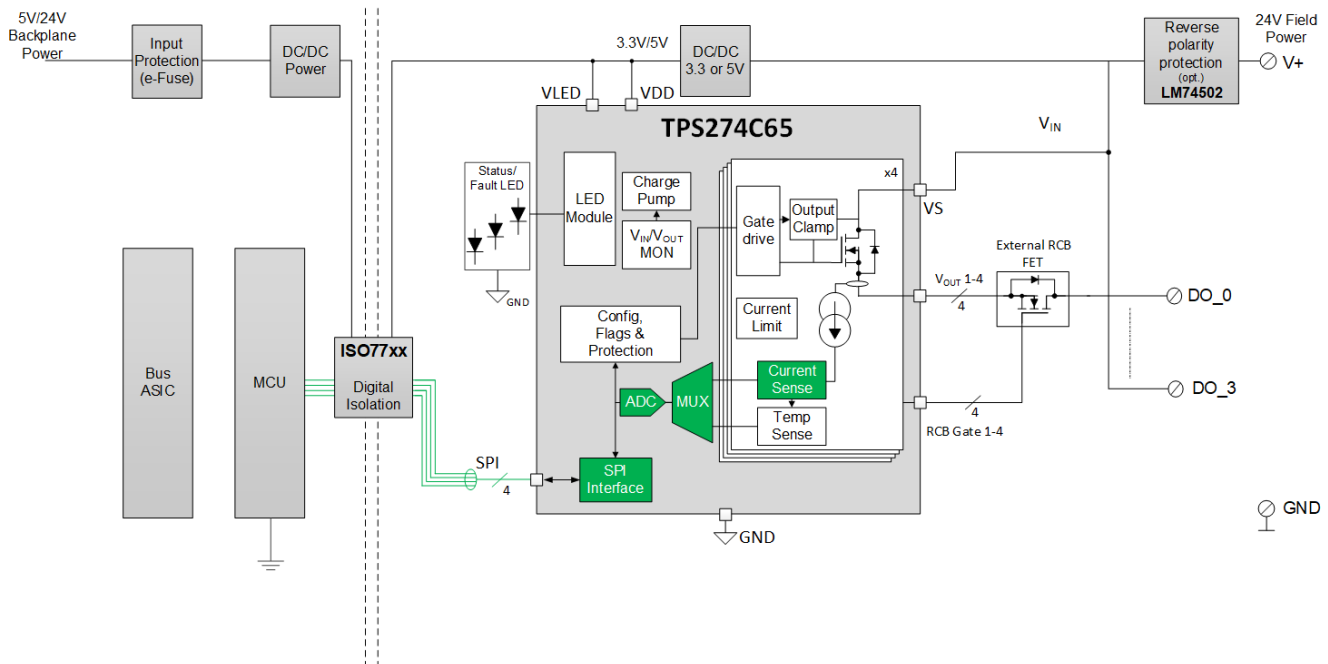


图 4-2. PLC 数字输出模块中 TPS274C65 的简化方框图

除了电流检测之外，SPI 和集成式 ADC 还有助于测量和报告其他信号，例如温度、电源电压和输出电压。总之，这种诊断和报告功能有助于现场和远程监控数字输出负载。高压侧开关可以通过 SPI 报告电流传感数据和故障信息，帮助系统和技术人员快速识别问题并消除潜在的根本原因。显示系统在发生故障前如何运行的诊断数据支持建立预测性解决程序，以防止将来发生类似故障。

## 4.3 适用于工业系统的特性：增强的 EFT、反向电流阻断、LED 驱动

PLC 和工业控制系统的一个独特因素是负载通常为未知。这些数字输出端口必须足够稳健，以支持可现场连接的各种负载（以及随后的各种故障事件）。因此，高侧开关可能提供符合 IEC（国际电工委员会）工业标准的 UL 认证或测试。第 1.2.4 节讨论了几种常见工业标准。例如，TPS272C45 得到了 UL 2367 认可（固态过电流保护器件的标准）。



**TPS281C30E** 提供了针对重复电气快速瞬变 (EFT) 的增强层稳健性 (符合 IEC 61000-4-4)，有助于提高系统稳健性，防止出现意外耦合。当在 **VS** 或 **VOOUT** 处施加高达 2.5kV 的 EFT 脉冲时，器件会保持关断状态，并具有适当的输出和耦合电容器 (有关详细信息，请参阅器件数据表)。

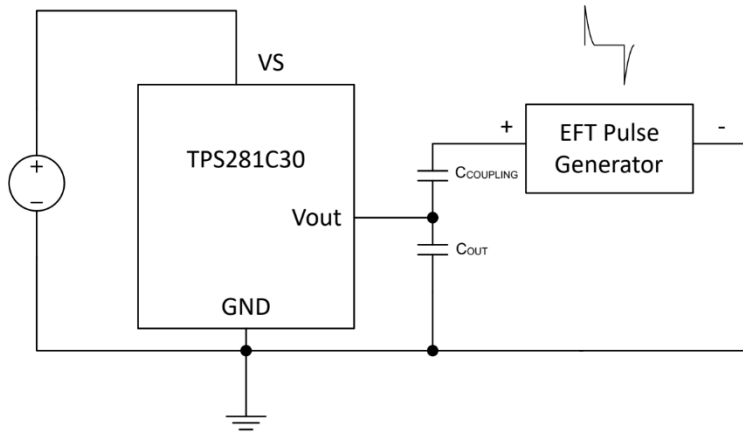


图 4-3. 显示如何根据电气快速瞬态脉冲对 TPS281C30 进行测试的简化图

具有增强 EFT 的器件可以实现比其他高侧开关更强的栅极下拉。在关断状态下，这有助于器件保持关断状态，即使在发生 EFT 脉冲时也是如此。最大 EFT 电压电平  $V_{EFT}$  在很大程度上取决于测试电路中使用的元件。输出电容器越大，耦合电容器越小，可承受的 EFT 电压就越高。

当输入电源不可用时，输出端误接线可能会导致工业系统中出现反向电流。另一常见原因可能是容性负载较大。例如，如果存在大量的负载电容并且电源电压节点具有瞬态下降，则输出电压可能大于电源电压。来自其他负载的浪涌电流会导致电源电压下降。**TPS274C65** 可监控电源和输出电压，以便在反向电流或输入电源故障情况下提供真正的反向电流阻断。**TPS274C65** 利用集成栅极驱动器实现反向电流阻断，用于驱动外部阻断 MOSFET。

**TPS274C65** 还包括 SPI 通信和内部 ADC，如第 4.2 节所述。**TPS274C65** 中集成了电流检测电路和 ADC，使其能够通过数字输出模块中的隔离栅传输电流检测数据，由于路由发生在高侧开关内部，因而减少了 ADC 通道的路由。**TPS274C65** 还包含一项 PLC 模块的附加特性：一个 LED 驱动器 (驱动八个 LED)。这样 **TPS274C65** 就可以为四个通道中的每个通道驱动一个开关状态 LED 及一个故障 LED 的常见配置。

## 4.4 其他专有特性

### 4.4.1 集成看门狗计时器

在安全关键型系统中，必须监控处理器和微控制器，以始终验证功能。实现该目的有一种方法是使用外部看门狗计时器（外部元件必须从控制元件接收常规信号）。如果在控制元件向看门狗发送信号之前经过一段时间，看门狗会发出故障信号。

TI 在 GPIO 控制器件及 SPI 控制器件上提供多个具有集成看门狗计时器的高侧开关。在 SPI 控制的器件上，该看门狗计时器是可编程的。

### 4.4.2 循环冗余校验 (CRC)

同样，TI SPI 控制的高侧开关具有可选的循环冗余校验 (CRC) 特性。这会基于 SPI 传输来生成校验和。在写入过程中，SPI 控制器会计算该校验和并将校验和附加至 SPI 帧中。如果附加的校验和与高侧开关计算的校验和不同，高侧开关会发出故障信号。在读取过程中，高侧开关将校验和附加到 SPI 帧，以便 SPI 控制器与计算出的值进行比较。

### 4.4.3 稳态可编程 PWM 开关

可编程 PWM 开关模式是 SPI 控制的高侧开关及控制器共有的一项高级特性。在此模式下，器件可编程为在稳态状态下以特定的占空比和频率开启外部或内部 FET。在此模式下，编程的电流限制、热保护和其他保护均仍处于活动状态。对于开关，可编程的最快频率为 1770Hz。控制器的开关频率上限取决于为驱动负载而选择的 FET 的尺寸及数量。

## 4.5 智能电子保险丝高侧开关保护特性

在汽车行业，架构发生了转变。由于需要进一步的材料和电源优化，进一步推动了从传统域架构向基于区域的架构的转变。域架构是如今汽车电气组织的主要模式。域架构是一种按功能划分的电气系统及负载组织。因此，车身负载和照明分别为车身和照明域以及仪表组、中心显示屏和扬声器的信息娱乐域。相反，区域架构是指按位置划分的汽车结构。区域可根据车辆的区域（如前部、后部、左侧和右侧）或负载浓度较高的区域（如座椅或车顶区域）进行界定。区域架构有望通过减少电缆来优化材料，并通过更智能的电子产品来优化功耗。

### 4.5.1 具有可编程时间电流特征 ( $I^2T$ ) 的能源管理

一种有助于功率和材料优化的方法是使用可编程  $I^2T$  曲线，即电流的平方乘以时间。根据流经组件的电流，该值代表组件中的能量。在熔断型保险丝中，它是与保险丝熔断的热阈值相关的能量。当在 IC 中以数字方式复制和实现时，无论物理可访问性如何，任何汽车电子控制单元 (ECU) 都可以使用保险丝保护。

因此， $I^2T$  半导体设计的优势不是一维的。智能电子保险丝高侧开关具有更高的可配置性，使设计人员能够定制保护曲线，以匹配熔断型保险丝、导线容差曲线或定制负载保护方案。由于这种保护完全通过软件进行配置，因此也开启了硬件重用的大门。

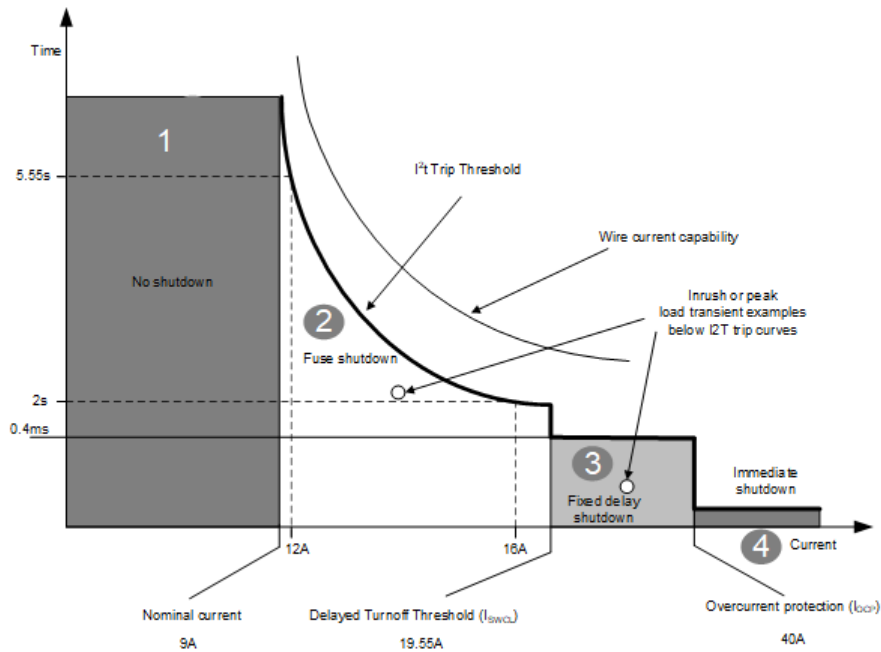


图 4-4.  $I^2T$  曲线的电流与时间关系图，其中突出显示了四个部分：正常运行、保险丝关断、固定延迟关断及立即关断

### 4.5.2 通过低功耗模式实现功耗优化

随着每一代汽车的电气需求不断增加，车辆中电源系统对更高能效的需求也在增加。智能电子保险丝高侧开关的一项特性通过引入低功耗模式解决了这一问题，该模式仍然提供保护，但电流消耗要低得多。低功耗模式适合在车辆熄火状态下需要少量电流的负载。智能电子保险丝高侧开关可以独立监控负载，同时本身消耗很少的功率，从而使 MCU 进入睡眠状态。当电流上升并导致退出低功耗模式时，智能电子保险丝高侧开关将通过唤醒信号通知 MCU。TI 智能电子保险丝高侧开关具有可编程低功耗模式退出电流阈值。低功耗模式是一种进一步优化车辆配电的方法，使其更高效、用途更广泛，以满足更严苛的系统要求。此特性通过两种方式实现：通过器件中的主导通 FET（如图 4-5 中蓝色所示）或通过绿色所示的较小的次级内部 FET。

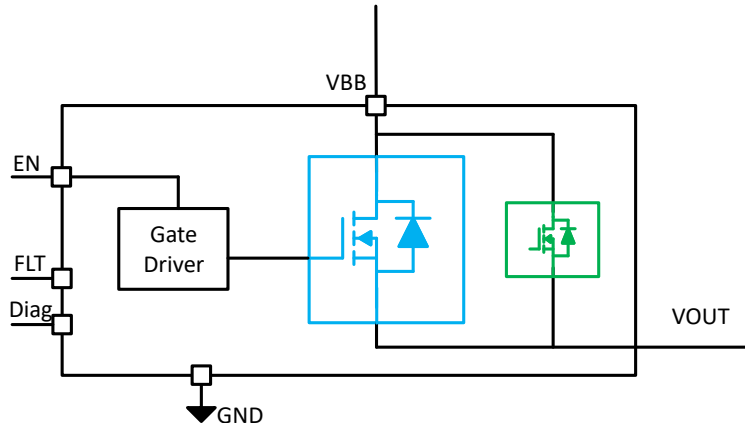


图 4-5. 集成式 FET 器件的低功耗模式实现（使用主集成式 FET 或者次级集成式 FET）

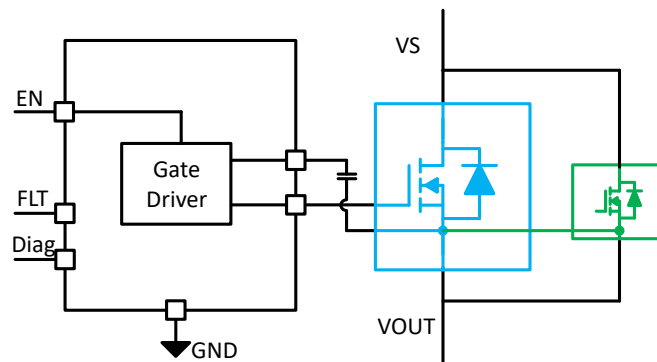


图 4-6. 外部 FET 器件的低功耗模式实现（将辅助栅极驱动器用于更小的功率 FET）

外部 FET 智能电子保险丝高侧开关以略微不同的方式实现低功耗模式。某些型号具有次级集成 FET，低功耗模式电流通过该 FET。但是，大多数其他型号都具有第二个栅极驱动器来控制次级外部 FET。次级 FET 的尺寸更小，能够传递更小的电流。该器件可自行自动从低功耗模式切换到稳态，但仍然可以手动控制低功耗模式的退出和进入。

汽车配电对低功耗模式的需求不断增长，在许多地方，标准负载的需求也在不断增加。因此，TI 发布了以低功耗模式作为基本特性的高侧开关。对于这些器件，例如 TPS4HC120-Q1 和 TPS2HC120-Q1 等，低功耗模式为基本模式且完全自动运行，只需极少的额外控制和支持电路，但可实现额外的电源优化。

### 4.5.3 下电上电后的存储器保留 (NVM 或 EEPROM)

由于具有如此多的数字配置和数据处理功能，在智能电子保险丝高侧开关中备份某种存储器非常重要。故障触发的下电上电及标准下电上电（每次汽车引擎停止或启动时）会导致未配备 EEPROM 的器件的配置复位。智能电子保险丝高侧开关具备 EEPROM 备份以防止这种情况发生。所有可配置的阈值和功能设置都受到保护，免受下电上电的影响，包括 I<sup>2</sup>T 设置、电容充电、电流限制和开路负载设置。

## 5 总结

TI 为汽车配电单元、PLC 数字输出模块、电池管理系统等提供了丰富的高侧电源开关解决方案。在寻找合适的器件时，首先要考虑系统的电压和电流要求。接下来，考虑高侧电源开关的作用（用于限制电流或断开电路）。然后，确定必要的保护和诊断。

对于中低电流负载驱动和配电，请参考高度集成的高侧开关。对于高电流负载驱动和断开开关，利用外部 FET 高侧开关控制器的灵活性。在试图仿真传统的熔断型保险丝或优化线束时，可以利用智能电子保险丝高侧开关集成的基于 I<sup>2</sup>T 的过流保护功能。要缩小器件范围，请使用 TI.com 上的产品选型表来筛选所需的参数和特性，从而满足系统要求。

## 6 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [使用负载开关和电子保险丝的电源多路复用](#), 应用手册。
2. 德州仪器 (TI), [电子保险丝基础知识](#), 应用手册。
3. 德州仪器 (TI), [选择合适的集成度来满足电机设计要求](#), 技术文章。
4. 德州仪器 (TI), [TI 功能安全主页](#), 网页。
5. 德州仪器 (TI), [理想二极管基础知识](#) 应用手册。
6. 德州仪器 (TI), [智能电源开关的可调节电流限制](#), 应用手册。

## 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