

Application Note

使用 TI 汽车智能电子保险丝在低输出电流下进行高精度电流检测



Patrick Shalton

摘要

TPS2HCS08-Q1 等德州仪器 (TI) 汽车智能电子保险丝具有非常高的电流检测精度，能够实现精确的 I₂T 保护、负载诊断和功率计算。但是，由于电流检测精度与负载电流成比例降低，仅靠高峰值电流检测精度还不足以区分不同的负载状态。例如，区分负载电路是否被故意关闭，还是由于开路负载故障而断开。为了增强低电流时的诊断性能，汽车智能电子保险丝器件提供了多种功能来提高低电流时的电流检测精度，包括开路负载调节和 ADC 调节。本应用手册介绍了这些特性，并提供了包含测试方法和结果的设计参考，展示了如何在设计中使用这些特性。

内容

1 简介	2
2 高侧开关电流检测和开路负载检测	3
2.1 高侧开关中的电流检测	3
2.2 高侧开关的开路负载检测	4
3 智能电子保险丝电流检测和开路负载检测	5
3.1 电子保险丝内的开路负载检测	5
3.2 开路负载电流检测调节	5
3.3 ADC 输入调节	5
3.4 OL_ON 和 ADC 输入调节编程过程	5
4 正常与开路负载调节测试结果	7
5 设计注意事项	8
6 总结	8
7 参考资料	8

插图清单

图 1-1. 区域控制器架构	2
图 2-1. 高侧开关电流检测架构	3
图 2-2. 高侧开关开路负载关断检测架构	4
图 2-3. 高侧开关电流检测范围分级	4
图 3-1. OL_ON 使能流程图	6

表格清单

表 4-1. 电流检测 ADC 代码	7
表 4-2. 电流检测输出	7
表 4-3. 电流检测精度	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

近年来，随着对增强性能、电源效率和高级安全功能的需求不断增长，导致现代车辆中广泛采用了复杂的电子产品。这一转变的一个关键组成部分是区域控制器的兴起，该控制器将车辆的电气系统细分为更小的区域或分区，以实现对配电和功耗的更精确控制。然而，这种复杂性的上升也带来了新的技术挑战，尤其是在诊断和故障检测方面。

为了满足这些要求，汽车系统正在从使用传统机械保险丝盒转换为采用电子保险丝的配电板，这些配电板具有出色的导线和系统安全方案（例如 I2T 保护）。借助电子保险丝的各种增强型诊断功能，可轻松实现区域控制器或其他子系统之间的正常运行和故障状态诊断。这方面的一个主要示例是能够区分处于关断模式的区域控制器与实际的开路负载故障情况，从而实现更准确的诊断输出，并加快维修技术人员的故障排除速度。

图 1-1 中展示了一种典型的高级区域控制器架构，其中配电板上的电子保险丝为每个区域控制器直接供电。

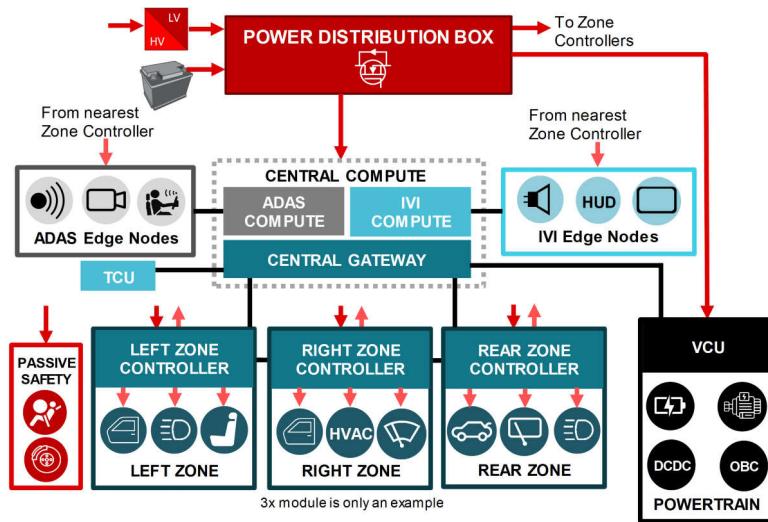


图 1-1. 区域控制器架构

2 高侧开关电流检测和开路负载检测

2.1 高侧开关中的电流检测

在驱动负载时，尤其是可能在下游连接或启用各种负载类型的负载，拥有有关负载电流大小的实时诊断反馈非常有用。分立式系统中使用的外部电流检测实现价格、电流消耗和电路板面积方面成本高昂。TI 的高侧开关通过集成专用电流检测输出来实现此功能，该输出可按比例降低负载电流，并可在外部电阻器上读取为模拟电压。有关 TI 高侧开关和高精度电流感应的更多信息，请参阅[智能高侧开关的高精度电流感应应用手册](#)。

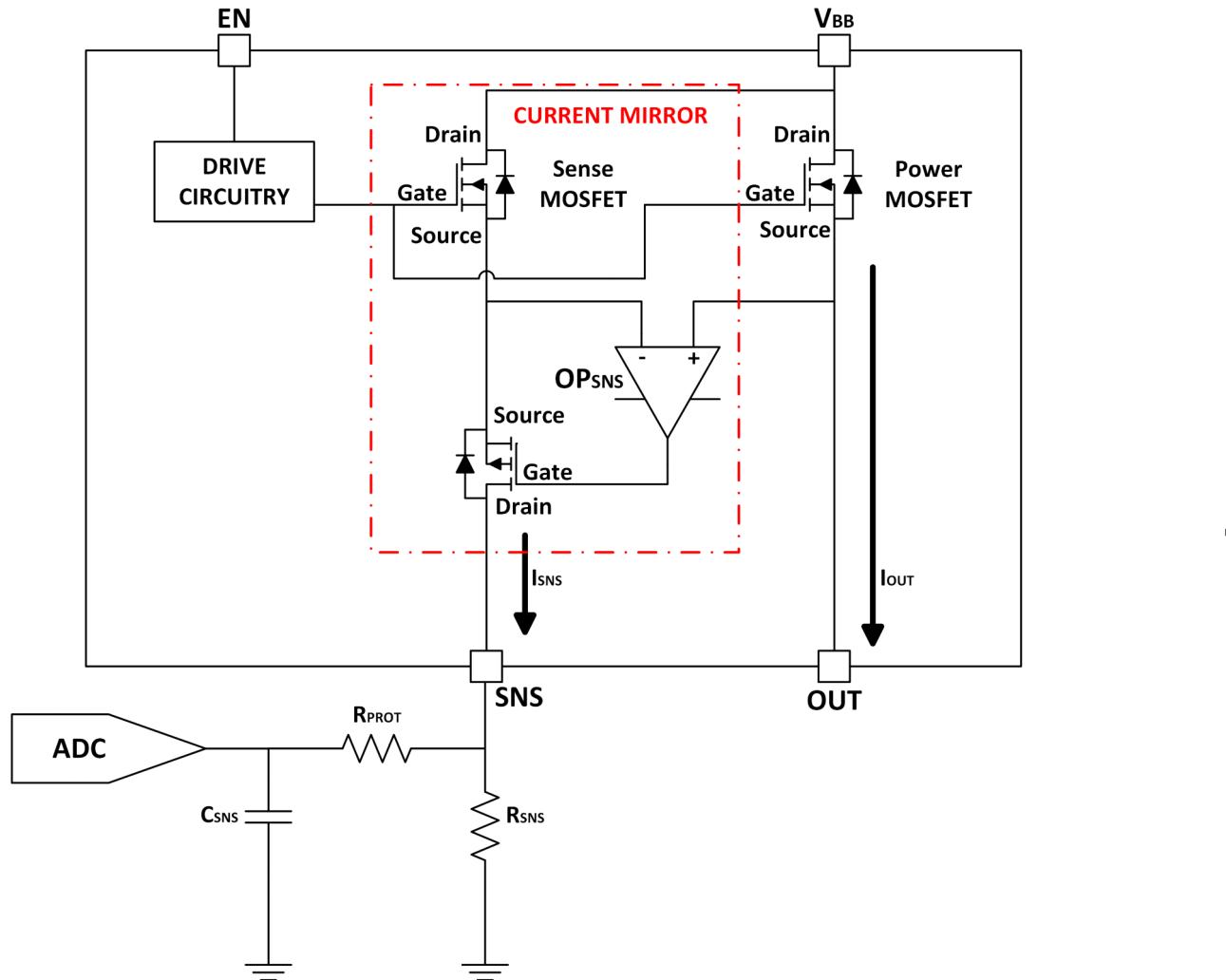


图 2-1. 高侧开关电流检测架构

TI 的智能电子保险丝进一步增强了此功能，利用集成 ADC 通过串行外设接口 (SPI) 读取并提供电流诊断信息，同时还能监测输入/输出电压及 FET 结温。这种额外的集成消除了对外部微控制器 (MCU) 或分立式 ADC 的需求，并可实现高精度、低功耗的 I²T 保护，大大降低了系统成本和复杂性。

2.2 高侧开关的开路负载检测

设计人员认为很有用的另一项功能是能够检测高侧开关输出端的开路负载或断线。在禁用器件时执行此操作很简单。在 V_{BB} 与 V_{OUT} 之间放置一个弱上拉电阻，并使用集成比较器测量上拉电阻上的压降。如果该压降小于 $2V$ （即 $V_{BB} - V_{OUT} < 2V$ ），则器件会确定存在开路负载故障。所有 TI 高侧开关和电子保险丝都使用上述方案集成了开路负载检测功能。

不过，在启用了器件的情况下尝试测量开路负载时，此任务会变得更加困难。使用与关断状态开路负载检测相同的电路是不可行的，因为启用器件后， V_{OUT} 需要始终接近 V_{BB} 。相对的，这时可以测量负载电流，如果该值低于特定阈值，则器件会报告开路负载故障。部分 TI 高侧开关采用这种方法，但这会带来两个问题。首先，被视为开路负载的电流由应用决定。在典型应用中，标称负载电流大于 $1A$ ，且输出电流 $<20mA$ 时，则视为开路负载。但是，如果标称负载电流小于 $20mA$ ，则器件会始终报告开路负载故障，这是不可接受的。其次，随着 FET 导通电阻的降低，精确测量低电流的难度呈指数级增加。因此，对于器件启用时的开路负载检测，设计人员使用电流检测来确定开路负载电流阈值并根据器件电流检测反馈识别故障。

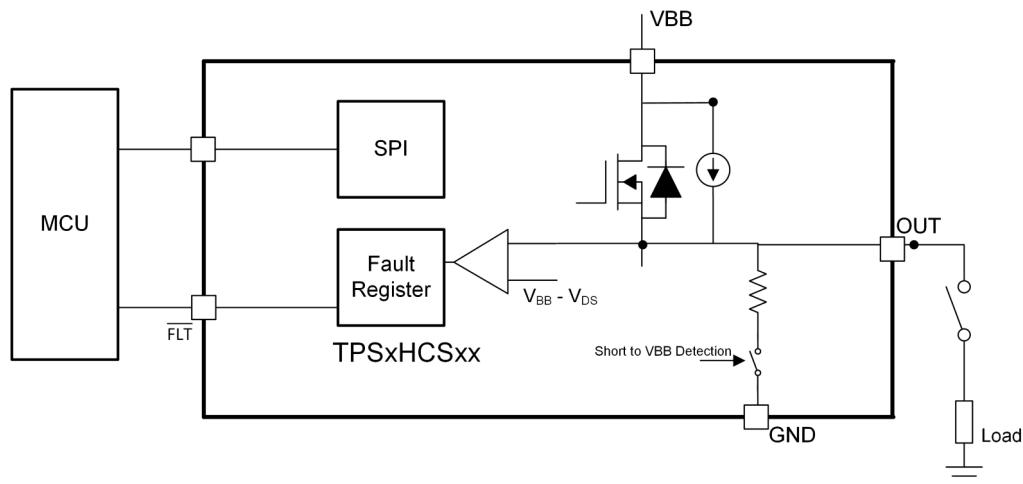


图 2-2. 高侧开关开路负载关断检测架构

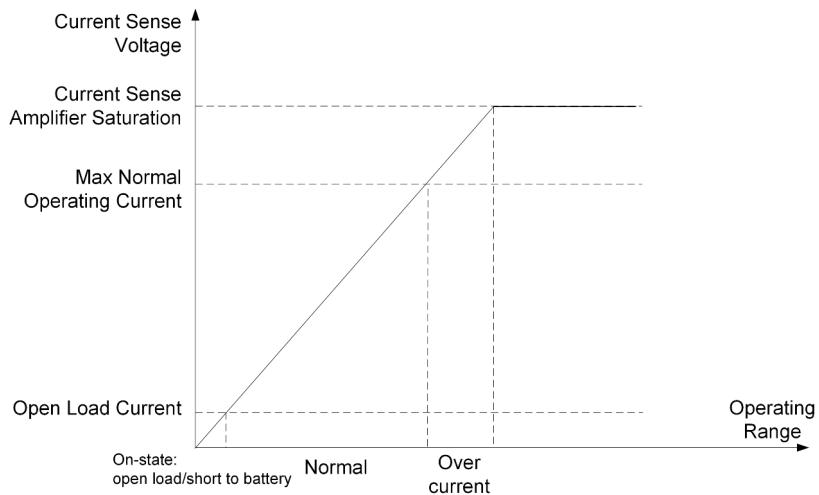


图 2-3. 高侧开关电流检测范围分级

3 智能电子保险丝电流检测和开路负载检测

3.1 电子保险丝内的开路负载检测

虽然标准高侧开关通常用于驱动单个负载，但智能电子保险丝通常用于向区域控制器或包含多个可编程负载的其他系统供电。鉴于这一安全关键型任务，智能电子保险丝必须能够检测系统中的一系列详细故障情况，包括开路负载。上面介绍的启用时开路负载方案会在某种程度上起作用。但是，由于电子保险丝的导通电阻非常低，且该模块被禁用时区域控制器的功耗极低，因此很难区分区域控制器何时被禁用，以及何时真的存在开路负载故障。为了应对这一情况，TI 的智能电子保险丝引入了另外两种灵活性来区分低电流工作状态：开路负载电流检测调节和 ADC 输入调节。

3.2 开路负载电流检测调节

例如，[TPS2HCS08-Q1](#) 的默认电流检测比例因子为 $K_{SNS} = 5000\text{A/A}$ ，即 $I_{SNS} = I_{OUT}/5000$ 。在负载电流高于 10A 期间，该 K_{SNS1} 精度极好，可达 $+/-4\%$ 。但是，随着负载电流减小，精度会因为电路的性质而下降，100mA 处的 K_{SNS1} 精度为 $+/-18\%$ 。在较低的电流下，此精度会呈指数级下降。

为了提高低电流下的精度，TI 智能电子保险丝采用了 OL_ON 模式。在此模式下，以 [TPS2HCS08-Q1](#) 为例， K_{SNS} 值从 5000A/A 降低到 1400A/A (K_{SNS2})，FET 导通电阻从 $8.7\text{m}\Omega$ 增加到 $27\text{m}\Omega$ ，从而在低电流下实现更高的电流检测精度。在这种情况下，100mA 处的 K_{SNS2} 精度为 $+/-10\%$ ，并且可通过 SPI 可靠地将电流读取到 10mA。

3.3 ADC 输入调节

TI 电子保险丝还提供将 ADC 测得的电流检测电压放大 8 倍的选项，通过在更高的输入电压下运行并产生放大 8 倍的 I_{SNS} 值来提高 ADC 精度。该功能可与 OL_ON 模式结合使用，以获得尽可能高的总计电流检测精度。

3.4 OL_ON 和 ADC 输入调节编程过程

可以通过将相应 CHx_CONFIG 寄存器中的相关 OL_ON_EN_CHx 位设置为高电平来启用 OL_ON 模式。为了使器件接受命令并进入 OL_ON 模式，输出电流必须低于 $I_{ENTRY_OL_ON}$ 阈值。如果输出电流不低于此阈值，则器件不会进入 OL_ON 模式，则 OL_ON_EN_CHx 保持低电平。如果输出电流低于 $I_{ENTRY_OL_ON}$ 且 OL_ON_EN_CHx 设置为高电平，则 K_{SNS} 会降低，FET 导通电阻会按如上所述增加，直到 OL_ON_EN_CHx 被设置为低电平或输出电流超过 $I_{EXIT_OL_ON}$ 。

要启用 8 倍 ADC 输入调节，请将 ISNS_SCALE_CHx 位和相应的 CHx_CONFIG 寄存器设置为高电平。无需启用 ADC 输入调节。

在 OL_ON 模式和 ADC 输入调节操作期间，TI 建议 MCU 定期检查 OL_ON_EN_CHx，确保器件仍处于 OL_ON 模式。读取相应通道电流检测时，ADC_RESULT_CHx_I 电流检测结果寄存器中包含 ISNS_SCALE_EFF_CHx 位，用于通知 MCU 使用哪个倍数来读取电流检测结果。该位直接显示使用的是 1 倍还是 8 倍 ADC 调节因子。

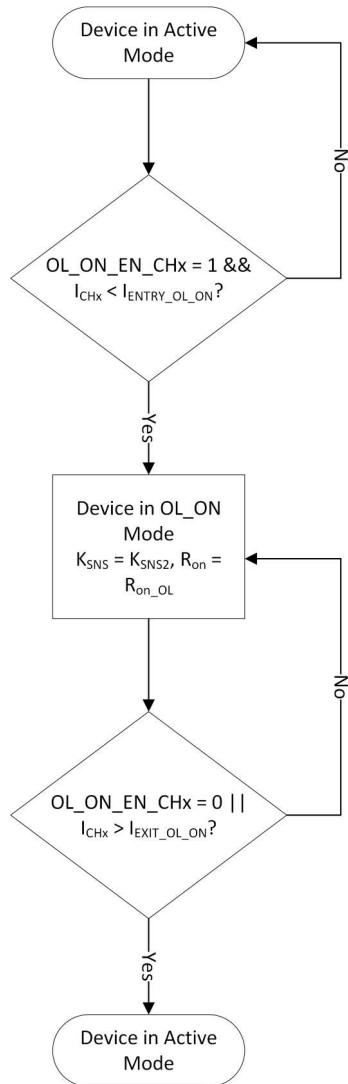


图 3-1. OL_ON 使能流程图

4 正常与开路负载调节测试结果

以下是一个示例系统，其中 TPS2HCS08-Q1 为可变负载供电，例如具备多个输出轨和低功耗模式的区域控制器。记录了标称全功率电流检测精度，然后将默认电流检测精度与使用 K_{SNS2} 和 K_{SNS2} 配合 8 倍 ADC 调节的电流检测精度分别进行比较。

该测试使用数据表建议的 R_{SNS} 值，即 698Ω 。根据得到的 ADC 代码计算输出电流的公式如下：

$$I_{OUT} = [KSNS * VADCREFHI / [1023 * RSNS * ISNS_SCALE]] * ADC_RESULT \text{ (Equation 1)} \quad (1)$$

其中：

$$KSNS = 5000 \text{ (对于 } K_{SNS1} \text{) ; } = 1400 \text{ (对于 } K_{SNS2} \text{)}$$

$$ISNS_SCALE = 1 \text{ (无 ADC 调节) ; } = 8 \text{ (对于 ADC 调节)}$$

$$V_{ADCREFHI} = 2.81V \text{ (典型值)}$$

$$RSNS = 698\Omega$$

表 4-1 至 表 4-3 详细说明了 10A、100mA、10mA 和 0mA 时的电流检测精度，同时应用了各个 K_{SNS} 和 ADC 调节因子。表 4-1 显示了 ADC 代码形式的结果，表 4-2 显示了计算输出电流形式的结果，表 4-3 显示了精度形式的结果。

表 4-1. 电流检测 ADC 代码

	K_{SNS1}	K_{SNS2}	K_{SNS2} 和 ADC 调节
10A	506	不适用	不适用
100mA	4	11	8E
10mA	0	1	9
0mA	0	0	6

表 4-2. 电流检测输出

	K_{SNS1}	K_{SNS2}	K_{SNS2} 和 ADC 调节
10A	9.956A	不适用	不适用
100mA	78.8mA	93.7mA	97.8mA
10mA	0mA	0.689mA	6.2mA
0mA	0mA	0mA	4.1mA

表 4-3. 电流检测精度

	K_{SNS1}	K_{SNS2}	K_{SNS2} 和 ADC 调节
10A	0.44%	不适用	不适用
100mA	21.2%	6.3%	2.2%
10mA	不适用	93.11%	38%
0mA	0%	0%	不适用

总体而言，有两种主要趋势需要使用 OL_ON 模式和 ADC 调节。第一个优势是，使用这两项功能时，在较低电流下的精度显著提高。第二个是，在 100mA 及更低的电流下，使用 K_{SNS1} 的 10 位 ADC 分辨率为 $19.7mA$ 。但是，使用 K_{SNS2} 配合 8 倍 ADC 调节时，ADC 的分辨率变为 $0.688mA$ ，从而能够更好地区分低电流之间的微小差异。

5 设计注意事项

使用 TI 电子保险丝进行设计时，尤其是在配电系统中，应使用最小值和最大值分析来离散所需的工作电流范围，以区分下游系统正常运行、关断模式、故障状态和开路负载状态。然后，确定需要与每个工作区域相对应的电子保险丝电流检测阈值，以及何时使用 **OL_ON** 模式和 **ADC** 输入调节。

TI 建议仅当在相应通道 ($I2T_EN_CHx = 0$) 上禁用 **I2T** 时才使用 **OL_ON** 模式和 **ADC** 输入调节，因为这些设置会直接修改 **ADC** 的输入电压并相应地降低相应的 **I2T** 阈值。

6 总结

随着汽车架构变得越来越复杂，对详细诊断和保护的需求也越来越大，需要更多关于系统状态的实时反馈以及更详细的控制和抽象级别。TI 智能电子保险丝通过引入面向未来的诊断功能（包括精确的开路负载检测）来满足这一需求，该功能采用高精度、可编程、可扩展的电流检测架构来帮助系统检测各种下游负载状态和故障模式。

7 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，[具有集成 I2T 有线保护和低功耗模式的 TPS2HCS08-Q1 8.9mΩ 汽车类双路 SPI 控制型高侧开关](#)，数据表
2. 德州仪器 (TI)，[智能高侧开关的高精度电流检测](#)，应用报告

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出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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月