

Application Note

使用 TI 智能电子保险丝高侧开关来替代熔断型保险丝



摘要

广泛应用于汽车和工业系统的熔断型保险丝具有一个完整的用途：过载及短路保护。但是，使用熔断型保险丝的保护方案设计具有挑战性，并且由于保险丝的固有可变性和热降额误差，通常受到限制，从而需要使线规和连接器超大。TI 的智能电子保险丝高侧开关简化了过载和短路保护，并提供了丰富的功能，具有精确的额定电流阈值、 I^2T 阈值、可重新分配性和深入的故障报告。本文档详细介绍了使用 TI 的智能电子保险丝高侧开关相对于熔断型保险丝的优势，并包含一个有关如何使用 TI 智能电子保险丝高侧开关替换指定的熔断型保险丝的设计示例。

内容

1 简介	2
2 熔断型保险丝性能	4
2.1 电流额定值	4
2.2 旋转曲线	4
2.3 I^2T 值	4
2.4 熔断时间	6
2.5 电压额定值	6
3 TI 智能电子保险丝高侧开关性能	7
3.1 过程/电压/温度注意事项	7
3.2 I^2T 曲线	8
3.3 额外保护和诊断	9
4 从熔断型保险丝切换至 TI 智能电子保险丝高侧开关	11
4.1 熔断型保险丝设计	11
4.2 电流额定值	11
4.3 I^2T 跳闸时间	12
5 总结	14
6 参考资料	15

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

随着汽车及其系统变得越来越复杂且基于云，对综合协调过载和短路保护方案的需求同样增加，其复杂性和重要性也相应增加。区域架构打造了优雅的功能和配电平台，但该平台及其布线必须在每个阶段得到保护（无论是直接由电池供电、区域输入级别还是输出级别），否则一些安全关键型功能（如线控转向或门锁）可能会受到影响。从历史上看，熔断型保险丝提供了这种保护，但由于需要专用的保险丝盒、可用的诊断反馈有限以及电线的过度设计，保险丝的公差过大，它们在现代车辆中已成为一种限制。这让开关必须使用电子保险丝高侧开关（而非熔断型保险丝）来保护电源树。TI 智能电子保险丝高侧开关在所有主要功能上都优于熔断型保险丝，包括动态可编程性、详细的故障报告、负载开关和电流限制，同时具有高精度电流检测和 I^2T 保护。这些优势极大地简化了协调保护方案，并提高了系统的安全性和性能。此外，由于具有精确的 I^2T 保护，可以减小线规和连接器尺寸，从而减轻车辆重量并优化成本和能源效率。

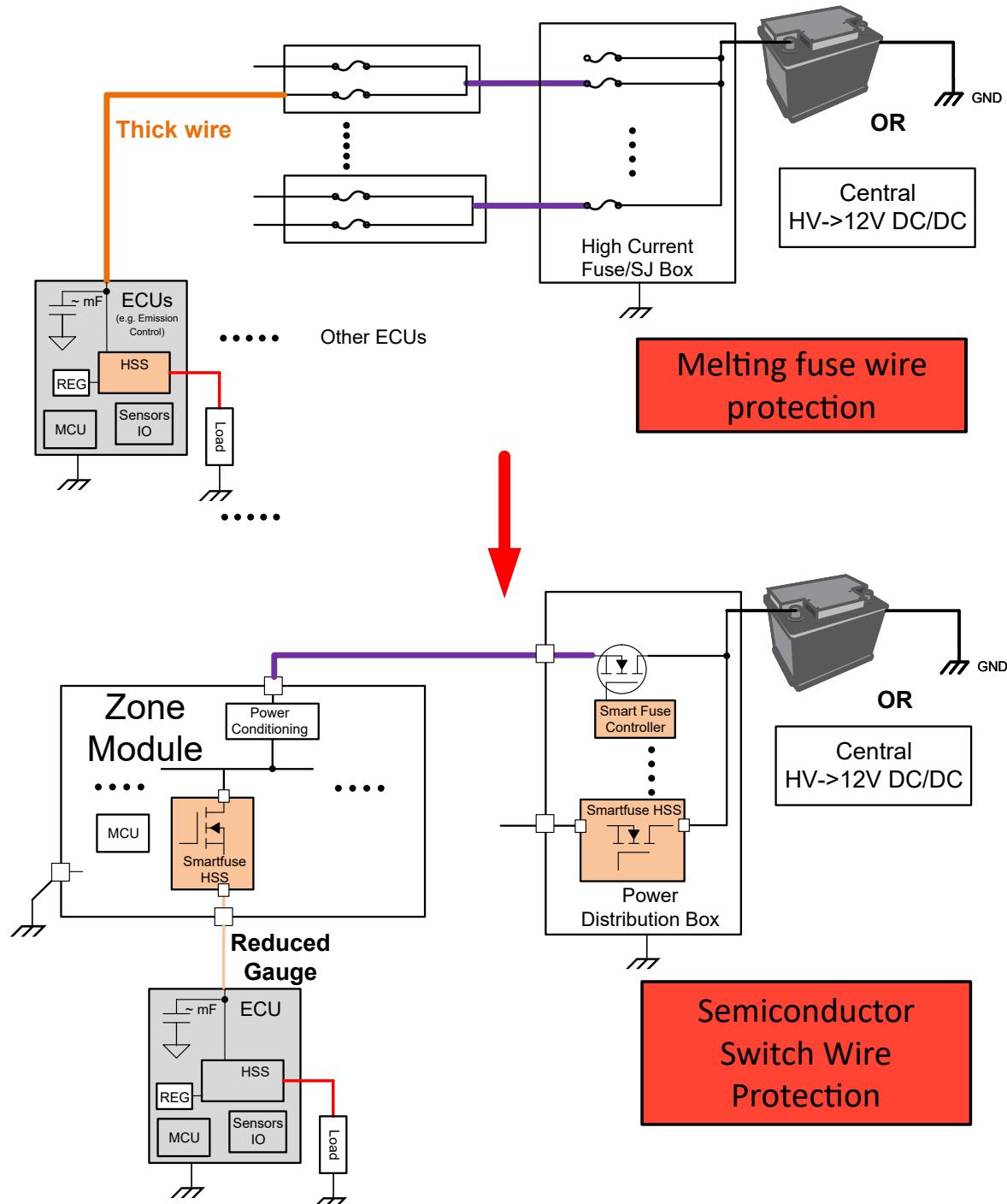


图 1-1. 区域架构配电

2 熔断型保险丝性能

熔断型保险丝自 19 世纪 80 年代起用于保护电报电缆免受恶劣天气和短路条件的影响，其历史由来已久且经过了深入研究。从理论上讲，熔断型保险丝只是一条具有低熔点的导线，因此这些器件是一种实现短路保护的简单、便宜且简单的方法。虽然熔断型保险丝仍然负责电路失效防护过流保护机制，但在过去百年中，技术发展需要保险丝在性能和特性方面具有额外的维度。例如，与 20 世纪 80 年代的计算机处理器主板相比，1900 年代的出厂电机无疑可以在保险丝跳闸之前处理更多相对瞬态过流。因此，保险丝设计变得更加精细和精确，同时保持相同的工作原理，在过流或短路情况下始终失效断开，从而得到保险丝的以下物理决定的注意事项和行为。

2.1 电流额定值

这是保险丝的主要参数，表示保险丝在室温下可以持续承载的最大电流。因此，在理想情况下，10A 保险丝可以无限期承载 10A 电流，而不会跳闸。但是，保险丝不是精确的元件，因此经验法则是将给定保险丝的额定电流降低 25%，以避免在低于额定电流的正常运行期间发生意外跳闸。因此，在室温下、对于超过 7.5A 的标称电流，不建议使用 10A 保险丝。

2.2 旋转曲线

由于保险丝的跳闸点基于其瞬时温度，因此与其数据表额定值之间的任何环境温度差异都会影响电流额定值。较低的环境温度需要较大的温差（电流）来熔化内部导线，而较高的环境温度需要较低的温差（电流）来熔化内部导线。保险丝数据表通常包含电流重新评级曲线，以帮助设计人员估算保险丝在不同环境温度下的性能。

例如，典型的保险丝重新评级曲线详细说明了 85°C 环境温度下的重新评级系数约为 91%，因此根据方程式 1，10A 保险丝在 85°C 下的额定电流为 6.825A。

$$\text{ReratedOperatingCurrent} = \text{CurrentRating} * 0.75 * \text{ReratingFactor} \quad (1)$$

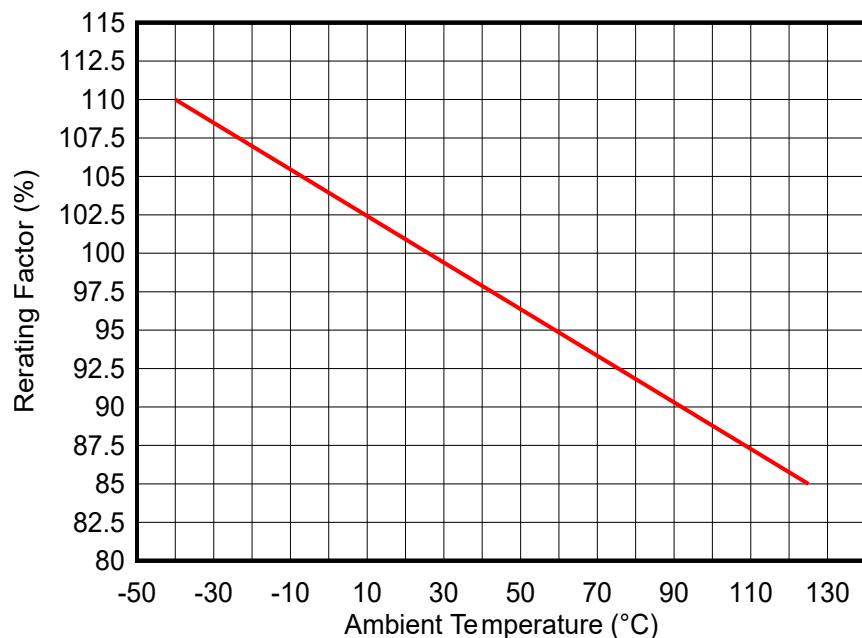


图 2-1. 熔断型保险丝重新评级曲线示例

2.3 I^2T 值

I^2T 表示保险丝跳闸前的热容量，以单位安培平方秒 (A^2s) 表示。在瞬态过流事件期间，使用 I^2T 值来估算保险丝的跳闸点。如果给定电流脉冲的 I^2T 值高于保险丝的额定值，那么保险丝在受到保险丝熔断时预计会熔断。

要计算脉冲的 I^2T 值，在脉冲持续时间 (T) 内对瞬时电流平方 (I^2) 值进行积分。这只需假设一个持续 50ms 的 5A 矩形电流脉冲即可实现。使用方程式 3，该脉冲的 I^2T 值为 $1.25A^2s$ 。

$$I^2T_{\text{Threshold}} = \int I(t)^2 dt \quad (2)$$

$$I^2T_{\text{Threshold for Rectangular Current Pulse}} = I^2 * t_{\text{pulse}} \quad (3)$$

2.3.1 熔断型 I^2T

熔断型 I^2T 是熔断保险丝的内部导线所需的热能。在确定保险丝是否适合允许特定瞬态电流脉冲时，使用该值。

2.3.2 电弧 I^2T

熔断保险丝的导线熔化后，熔化的金属和保险丝内的电离空气会在短时间内保持通过保险丝的导电路径断开。这称为电弧时间，可通过相应的 I^2T 值来表征。

一些保险丝设计为具有很短的电弧时间和低 I^2T 值。

2.3.3 总计清除 I^2T

这是负载看到的总 I^2T 值，该值应低于负载和电源的短路耐受能力和导线的 I^2T 阈值。可以看出，系统接线的总 I^2T 值高于熔断型 I^2T 值，因此导线通常会被过度使用，以免被电弧 I^2T 损坏。

2.3.4 保险丝 I^2T 注意事项

由于保险丝不是精密的元件，因此它们的 I^2T 值在多维度上取决于单元间变化、环境温度、压降、先前瞬态电流脉冲的数量，甚至是通过保险丝的瞬态电流条件。因此，无法保证保险丝的 I^2T 参数，因为它们的值和时间-电流图只是典型值，并且必须设计宽安全裕度，以考虑允许的电流瞬态下的保险丝变化，并确保电线得到适当保护。

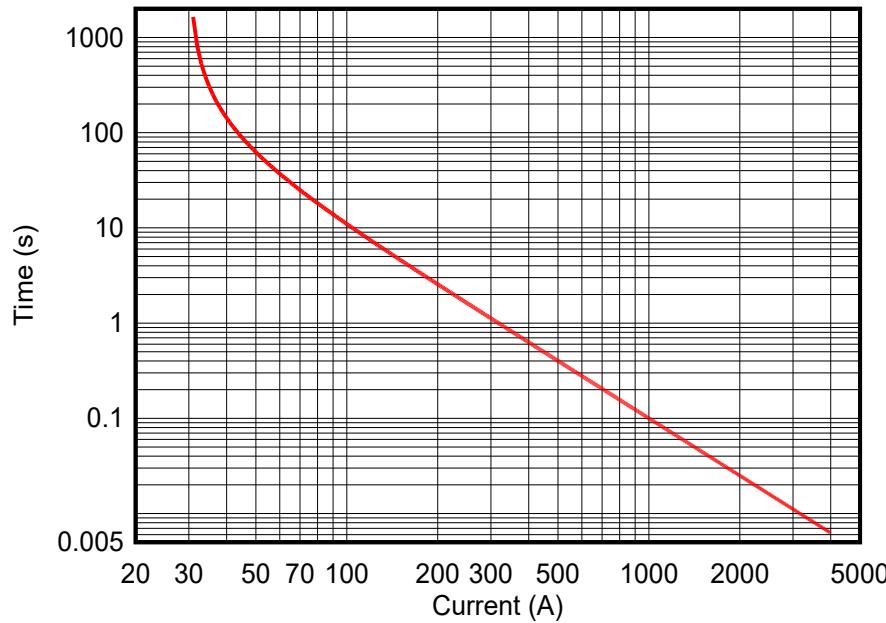


图 2-2. 熔断保险丝时间-电流图示例

2.4 熔断时间

保险丝通常可以保证在不同相对电流下的断开时间。例如，根据表 2-1，行业标准保险丝提供不同相对电流下的熔断时间。

表 2-1. 熔化保险丝熔断时间示例

电流额定值的百分比	最小/最大熔断时间 (s)
110	360000/ ∞
135	0.75/600
160	0.25/50
200	0.15/5
350	0.08/0.5
600	0/0.15

可以看出，在每个相对电流值下，熔断时间变化幅度为两到三个，、只有达到额定电流的大约 130% 时，才能保证保险丝跳闸。

2.5 电压额定值

保险丝的额定电压必须高于系统的额定电压，以抑制保险丝熔断后产生的电弧。

3 TI 智能电子保险丝高侧开关性能

为了满足当今有线保护系统的严苛需求，TI 智能电子保险丝高侧开关（如 TPS2HCS08-Q1 和 TPS2HCS10-Q1）具有高度可编程、高性能、精密的保险丝功能，同时集成高侧开关的强大功能。为了实现这一目标，TI 智能电子保险丝高侧开关将 ADC、高级数字内核和 SPI 通信集成到高侧开关中。在使用 TI 智能电子保险丝高侧开关设计保险丝功能时，以下运行参数是相关的。

3.1 过程/电压/温度注意事项

TI 智能电子保险丝高侧开关的内部模拟电路具有温度补偿功能，因此电流检测、I_{2T} 阈值和过流阈值等特性在整个温度范围内都是准确的。

对于基于电流检测的阈值，应考虑三种数据表精度： K_{SNS} 精度、 $I_{SNS,ADC,ACC}$ 精度和 $V_{ADCREFHI}$ 精度。

3.1.1 最高工作温度

TI 智能电子保险丝高侧开关包含称为热关断的过热保护。当器件的内部温度超过大约 180°C 时，该器件会触发热关断并关闭输出。

为了确保正常运行期间不会发生热关断，所选器件必须能够在最高环境温度下传递最大稳态负载电流而不触发热关断。可使用方程式 4 对此进行估算。

$$T_J = T_{amb} + (R_{\theta JA} * (I_{OUT}^2 * R_{ON,max})) \quad (4)$$

3.2 I²T 曲线

TI 智能电子保险丝高侧开关使用完全可编程的四级过流保护方案，如图 3-1 和图 3-2 所示。每个阈值都可以在启动期间和动态地通过 SPI 寄存器空间进行配置。如果需要更多阈值选项，可以动态调整外部电流检测 (SNS) 电阻器，以达到数据表中未指定的任何阈值。

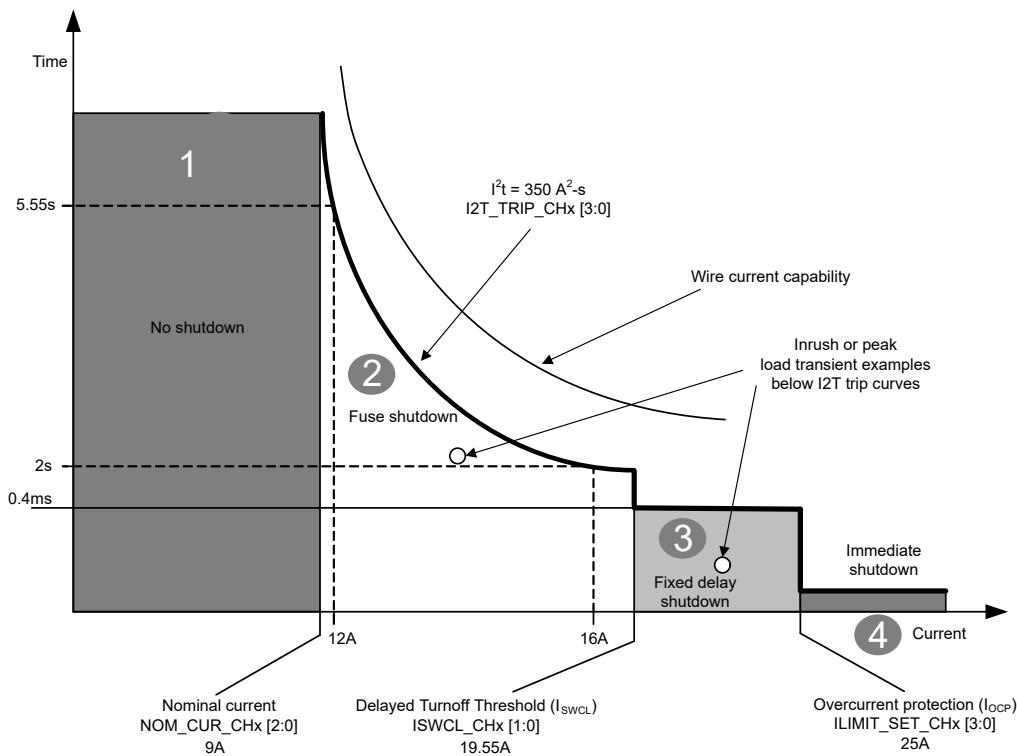


图 3-1. TI 智能电子保险丝高侧开关过流保护方案

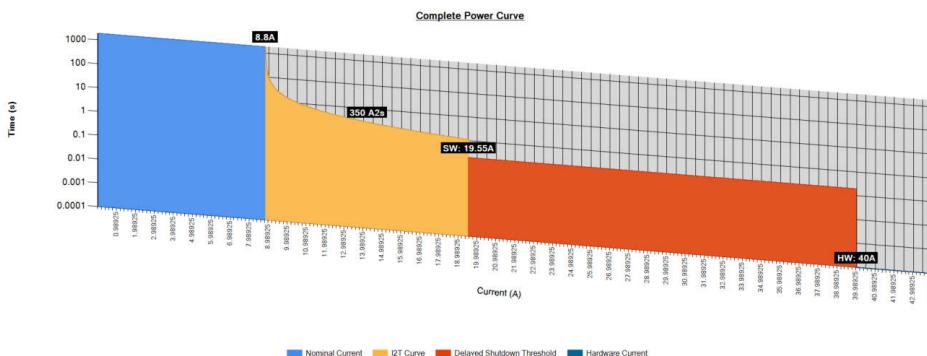


图 3-2. 过流保护设置示例

3.2.1 标称电流阈值 (INOM)

此阈值类似于保险丝的额定电流 - 低于此电流时，保险丝永远不会由于 I²T 过流而跳闸，而高于此电流时，将开始 I²T 积分。由于该阈值随温度的变化很小，因此不必像熔断型保险丝那样进行降额。

3.2.2 I²T 保险丝阈值

当输出电流超过 INOM 时，器件根据方程式 5 开始 I²T 累积，其中 $dt = 50 \mu s$ 。当达到编程的 I²T 阈值时，输出将关闭，并报告 I²T 故障。如果在达到 I²T 阈值之前输出电流降至 INOM 以下，则 I²T 计数器将根据方程式 5 递减。

由于 I^2T 精度可以进行量化，因此可以使用最小和最大曲线来绘制 I^2T 或时间电流图，从而使系统能够更好地控制其导线和元件可以经受的最大能量。

$$I^2T_{\text{count}} = \int_0^t (I_{\text{out}}^2 - I_{\text{NOM}}^2) dt \quad (5)$$

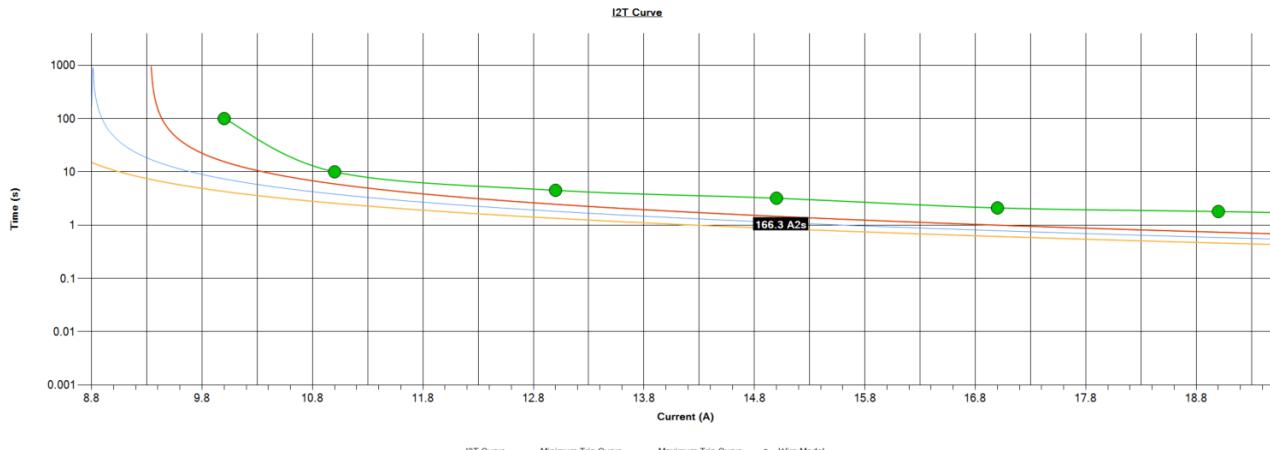


图 3-3. I^2T 跳闸时间示例

3.2.3 固定延迟关断阈值

如果高于该阈值的电流持续时间较短且可编程，则器件会关断。该长度允许非常短的瞬态过流事件消隐时间，但关断速度比熔断型保险丝的跳闸速度快得多。

3.2.4 即时过流保护阈值 (I_{OCP})

如果负载电流在任何时候超过此值，输出将在数微秒内立即关闭。该保护始终处于激活状态，并可在任何时候编程为高于固定延迟关断阈值、处于 I^2T 区域内或低于 I_{NOM} 。

可以看出，与熔断型保险丝相比，此保护可以更快地关闭输出，这一点对于敏感的下游电子器件至关重要。

3.3 额外保护和诊断

3.3.1 其他保护

3.3.1.1 接地短路保护

TI 智能电子保险丝高侧开关通过组合两种保护功能来实现稳健的接地短路保护： I_{OCP} （上文详述）和相对热关断。为了实现相对热关断，该器件会监控其 FET 和控制器之间的温差。如果该差异超过大约 60°C ，器件将关闭，直到温度差均衡。

3.3.1.2 电容充电

通过使用可编程恒流限制电容充电模式，可以在最小输入干扰下轻松对大系统电容进行充电。

3.3.1.3 跛行回家模式/看门狗/CRC

TI 智能电子保险丝高侧开关包含多个安全关键型功能，有助于在系统故障发生灾难性故障之前检测并提供保护。其中包括跛行回家模式检测、集成看门狗和 CRC，如果 LHI 引脚的数字值不符合预期，连接的 MCU 在给定时间内未发送 SPI 帧，或者器件计算出的 CRC 校验和与 MCU 附加的校验和不匹配，则智能电子保险丝高侧开关可以输出故障并执行相应操作。

3.3.1.4 电池反向保护

在电池反向情况下，器件将开启其 FET，以防止电流流经体二极管，从而降低器件的功率耗散。有关电池反向保护的更多信息，请参阅 TI 智能电子保险丝高侧开关数据表。

3.3.1.5 电池/接地失效保护

如果 VBB 或 GND 在运行期间的任意时刻断开连接，输出将立即关断，以在故障状况期间保护器件和系统。

3.3.1.6 集成型电感放电

TI 智能电子保险丝高侧开关集成了漏源钳位功能，可对电感负载和存储在导线电感中的能量进行快速放电，从而无需将 TVS 或反激式二极管连接到保险丝输出。

3.3.2 附加诊断

利用 TI 智能电子保险丝高侧开关的高级数字内核，可以通过 SPI 接口读取详细的输入和输出故障、负载电流、输入和输出电压、漏源电压、FET 温度和器件状态，以提供更高的系统安全性和信息输出。

4 从熔断保险丝切换至 TI 智能电子保险丝高侧开关

4.1 熔断型保险丝设计

例如，考虑为 5A 标称电流负载设计保护方案。根据公式 1，可以计算出，应选择额定值为 7.5A 的保险丝以避免干扰性跳变。可使用表 1 中的数据创建表 2 来评估不同输出电流的跳闸时间。

表 4-1. 5A 标称电流负载下的熔断型保险丝熔断时间

电流 (A)	最小/最大熔断时间 (s)
8.25	360000/∞
10.125	0.75/600
12	0.25/50
15	0.15/5
26.25	0.08/0.5
45	0/0.15

可以看出，在保险丝电流超过 10A（超过标称电流的两倍以上之前），熔断型保险丝不能保证断开。如果负载、上行电源或连接线在长达 10 分钟内无法承受 10.125A 电流，则必须在相应的系统中设计额外的余量，以适应熔断型保险丝容差。同样，负载、上行电源和连接线必须能够在长达 150ms 的时间内处理 45A 电流，这会显著增加整个电源树中的电路的复杂性并使电路不堪重负。

4.2 电流额定值

可以使用 TPS2HCS10-Q1 等 TI 智能电子保险丝高侧开关代替熔断型保险丝，以便控制、保护该电源轨并增强诊断功能。从 TPS2HCS10-Q1 数据表中的表 8-33 NOM_CUR_CH1 位可以看出，该器件提供 4A 至 15A 的可编程标称 INOM 阈值，其中 RSNS = 700 Ω。

表 4-2. TPS2HCS10-Q1 I2T_CONFIG_CH1 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-14	TCLDN_CH1	R/W	0h	这些位设置通道 1 在 I2T 关断后的冷却时间（或重试时间）。 注意：如果使用设置 0x0，则通道将在 I2T 关断后保持关断状态而不会重试。要在此设置中重试，请将这些位更改为 0.8s、2.0s 或 4.0s 选项，以允许器件在 I2T 关断后重试。 0h = 无限期冷却 1h = 0.8s 2h = 2.0s 3h = 4.0s
13-11	RESERVED	R/W	0h	保留
10-9	SWCL_DLY_TMR_CH1	R/W	0h	这些位将设置计时器，如果 IOUT 电流持续超过 ISWCL 电平达到配置的时间，通道 1 将关断。 0h = 0.2ms 1h = 0.4ms 2h = 1.0ms 3h = 2.0ms
8-7	ISWCL_CH1	R/W	0h	这些位设置通道 1 的延迟关断电流检测值 ($I_{SWCL,700}$)。IOUT 电流超过 $I_{SWCL,700}$ 值后，计时器将启动；如果电流保持高于 $I_{SWCL,700}$ 阈值的持续时间达到 SWCL_DLY_TMR_CH1，将关断通道。 该阈值应设置为低于电流检测饱和值 ($I_{OUT,SAT} = K_{SNS1} * I_{SNS,SAT}$)。以下电流阈值假设 $R_{SNS} = 700 \Omega$ 。要根据不同的 R_{SNS} 值计算新的 $I_{SWCL,700}$ 阈值，可使用以下公式： $I_{SWCL,ADJ} = I_{SWCL,700} * (700/R_{SNS})$ 0h = 19.55A 1h = 17.6A 2h = 16.05A 3h = 13.3A

表 4-2. TPS2HCS10-Q1 I2T_CONFIG_CH1 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
6-3	I2T_TRIP_CH1	R/W	0h	<p>这些位设置通道 1 的 I²T 跳闸值。</p> <p>注意：I²T 跳闸值的参考公式如下：</p> $I^{2}T = (I_{OUT1}^2 - NOM_CUR_CH1^2) * t$ <p>以下值假设 $R_{SNS} = 700 \Omega$。要根据不同的 R_{SNS} 值计算新的 I²T 跳闸值，可使用以下公式：</p> $I^{2}T_{ADJ} = I^{2}T_{700} * (700/R_{SNS})^2$ <p>注意：器件处于冷却周期时，无法修改 I²T_TRIP_CH1 值。</p> <p>0h = 8.8 A2s 1h = 13.1 A2s 2h = 26.3 A2s 3h = 39.4 A2s 4h = 52.5 A2s 5h = 65.6 A2s 6h = 78.8 A2s 7h = 91.9 A2s 8h = 109.4 A2s 9h = 126.9 A2s Ah = 144.4 A2s Bh = 166.3 A2s Ch = 192.5 A2s Dh = 218.8 A2s Eh = 262.5 A2s Fh = 350 A2s</p>
2-0	NOM_CUR_CH1	R/W	0h	<p>这些位设置 I²T 功能通道 1 的标称电流值。如果为通道 1 使能 I²T 功能，则高于该值时，器件将进入 I²T 累加模式。</p> <p>下面的标称电流值假设 $R_{SNS} = 700 \Omega$。要根据不同的 R_{SNS} 值计算新的 I²T 跳闸值，可使用以下公式：</p> $NOM_CUR_CH1_{ADJ} = NOM_CUR_CH1_{700} * (700 / R_{SNS})$ <p>注意：器件处于冷却周期时，无法修改 NOM_CUR_CH1 值。</p> <p>0h = 4.0A 1h = 5.0A 2h = 5.7A 3h = 6.5A 4h = 7.5A 5h = 9.0A 6h = 12.0A 7h = 15.0A</p>

在确定使用哪个 INOM 阈值时，必须定量分析 INOM 阈值精度，以便找到始终高于标称负载电流的阈值。公式 6-9 可以用于计算 INOM 阈值精度和最小/最大值。

$$INOM_{accuracy, min} = ((1 + K_{SNS1, accuracy, min}) * (1 + ISNS_{ADC, ACC, min}) / (1 + V_{ADCREFHI, accuracy, max})) - 1 \quad (6)$$

$$INOM_{min} = INOM_{typ} * (1 + INOM_{accuracy, min}) \quad (7)$$

$$INOM_{accuracy, max} = ((1 + K_{SNS1, accuracy, max}) * (1 + ISNS_{ADC, ACC, max}) / (1 + V_{ADCREFHI, accuracy, min})) - 1 \quad (8)$$

$$INOM_{max} = INOM_{typ} * (1 + INOM_{accuracy, max}) \quad (9)$$

使用公式 6-9 和相关数据表规格，可以发现，INOM = 5.7A 时的 INOM 阈值精度为 -11.63% 最小值、11.18% 最大值。因此，整个器件变化范围内的最小 INOM 阈值将为 5.04A，最大 INOM 阈值将为 6.34A，并且可以可靠地使用 INOM = 5.7A，而不会出现干扰性跳变。

4.3 I²T 跳闸时间

公式 10-12 可用于计算 I²T 的最小、典型及最大跳闸时间。

$$I^2T_{trip, typ} = \frac{I^2T_{TRIP}}{(I_{OUT})^2 - INOM_{max}^2} \quad (10)$$

$$I^2T_{trip, min} = \frac{I^2T_{TRIP}}{(I_{OUT} * (1 + INOM_{accuracy, max}))^2 - INOM_{max}^2} \quad (11)$$

$$I^2T_{trip, max} = \frac{I^2T_{TRIP}}{(I_{OUT} * (1 + INOM_{accuracy, min}))^2 - INOM_{min}^2} \quad (12)$$

使用公式 10-12 和 $I^2T_{TRIP} = 8.8A^2s$ ，可生成表 3，以比较不同相对电流电平下的最小和最大 I^2T 跳闸时间。

表 4-3. 适用于 5A 标称电流负载的 TI 智能电子保险丝高侧开关 I^2T /过流保护跳闸时间

电流 (A)	最小/典型/最大熔断时间 (s)
6.27	1.043/1.29/1.65
7.695	0.266/0.329/0.422
9.12	0.140/0.174/0.222
11.4	0.0744/0.0903/0.113
19.95	.0000075 或 SWCL_DLY_TMR
34.2	.0000075 或 SWCL_DLY_TMR
45	.0000075 或 SWCL_DLY_TMR

回顾表 4-3，一些显著的细节突出。

首先，TI 智能电子保险丝高侧开关的最小和最大断开时间比熔断型保险丝的可变数量级小。

其次，随着电流的增大，熔断时间从由 I^2T 算法确定切换到 SWCL_DLY_TMR。这是因为工作电流会进入固定延迟关断区域，因此熔断时间是一个可由软件编程的固定时间。如果不需要这种行为，可以将即时过流保护阈值编程为低于固定延迟关断阈值，或者可以降低 RSNS，以按比例将所有基于 I^2T 的阈值（包括固定延迟关断阈值）移至更高的水平。

第三，如果电流超过即时过流保护阈值，TI 智能电子保险丝高侧开关可以极其快速地打开（最大 $7.5\mu s$ ）。这比熔断型保险丝快了四个数量级以上。

TPS2HCS10-Q1 具有 $8.8A^2s$ 至 $350A^2s$ 的 I^2T_{TRIP} 阈值，只需一个器件即可满足几乎任何系统级瞬态电流要求。

5 总结

TI 智能电子保险丝高侧开关提供直观的 I²T 保护方案、强大的功能和增强的功能集，使得熔断型保险丝的开关变得简单、快速、具有成本效益，对于任何竞争系统来说都是不可避免的，因此提高了性能和实时反馈，同时改善了车辆重量、成本和效率。

6 参考资料

1. [Fuseology](#) , littlefuse.com
2. [MICRO2 刀片式熔丝 — 售后市场](#) , littlefuse.com

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 © 2026 , 德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期 : 2025 年 10 月