

## Application Note

## 使用 TI 智能电子保险丝的高级功能增强服务器电源设计



Avishek Pal, Swarna Sagar

## 摘要

本应用手册说明并演示了不同电子保险丝器件提供的两种不同过流保护机制。一种称为电流限制，另一种是断路器。通过使用实验结果，本文还讨论了在电力输送系统承受高压摆率，高频率和高振幅加载瞬态的企业服务器应用中基于电流限制的过流保护的局限性。可通过断路器机制以及 TI 的高电流电子保险丝系列器件中的可编程过电流消隐计时器来解决上述方法的局限性。本应用手册将通过实验结果讨论此设计。此外，本文还讨论了与市场上提供的传统电子保险丝器件相比，使用 TI 的高电流电子保险丝设计的系统级优势。

## 内容

1 引言.....	2
2 传统电子保险丝器件的过流响应.....	2
3 电流限制功能的挑战.....	4
4 使用 TI 高电流电子保险丝的建议设计.....	6
4.1 TPS25984、TPS25985、TPS25990 和 TPS1685 电子保险丝中的稳定状态过流保护.....	6
4.2 设计指南.....	8
5 热性能与持续瞬态加载电流.....	9
6 TI 电子保险丝设计带来的系统级优势.....	10
6.1 并联的电子保险丝数量较少.....	10
6.2 PSU 尺寸减小.....	10
7 总结.....	10
8 参考资料.....	10

## 商标

Intel® is a registered trademark of Intel Corporation.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

企业服务器主板的典型电源树如图 1-1 所示。随着人工智能和机器学习的进步，图形处理单元 (GPU) 的功耗会随着时间的推移而变得越来越高，并需要高压摆率和振幅电流脉冲来提高处理器的计算速度。图 1-2 描述了在 12V 总线 (50A 至 110A 加载瞬态) 的 1.8V 的 VRM 输出端施加从持续 8ms 的 300A 至持续 2ms 的 675A 加载瞬态，然后回到持续 8ms 的 300A 的加载瞬态 (根据 Intel® Birch Stream 服务器平台) 下看到的典型加载瞬态曲线。为了支持电压稳压器模块 (VRM) 输出端的这些加载瞬态，VRM 的功率级必须从输入电源单元 (PSU) 汲取脉冲电流，因为 VRM 的输入和输出滤波器无法支持这些高频加载瞬态。如图 1-1 所示，在 PSU 和 VRM 功率级之间放置了输入电源路径保护器件电子保险丝，以进行浪涌电流管理，并保护 PSU 和 VRM 免受不同故障的影响，例如输入欠压、输入过压、上电至输出短路、过流、输出热短路等。因此必须在电子保险丝内部实施过流保护机制，以便保护这些器件免受持续过流故障的影响，同时必须允许一定振幅和持续时间的瞬态峰值电流脉冲通过。

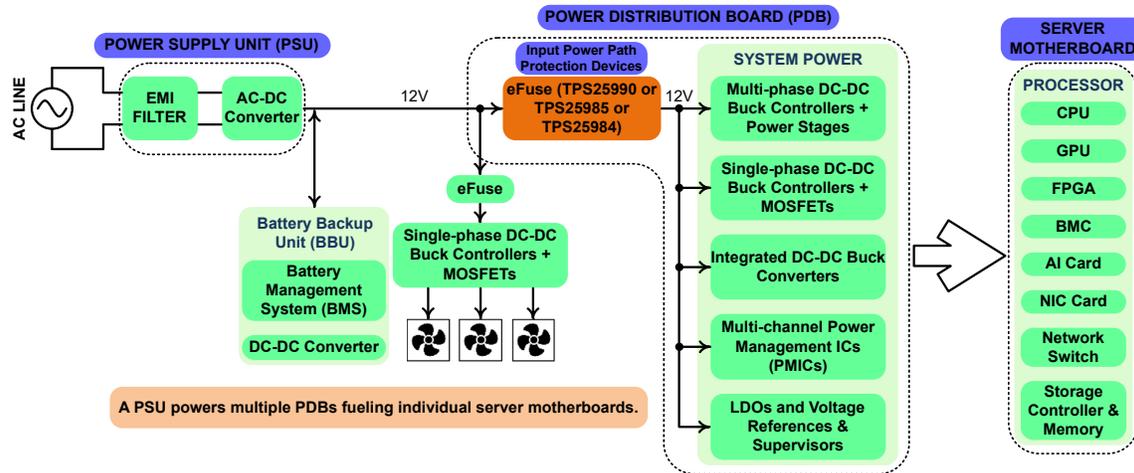


图 1-1. 企业服务器电源方框图

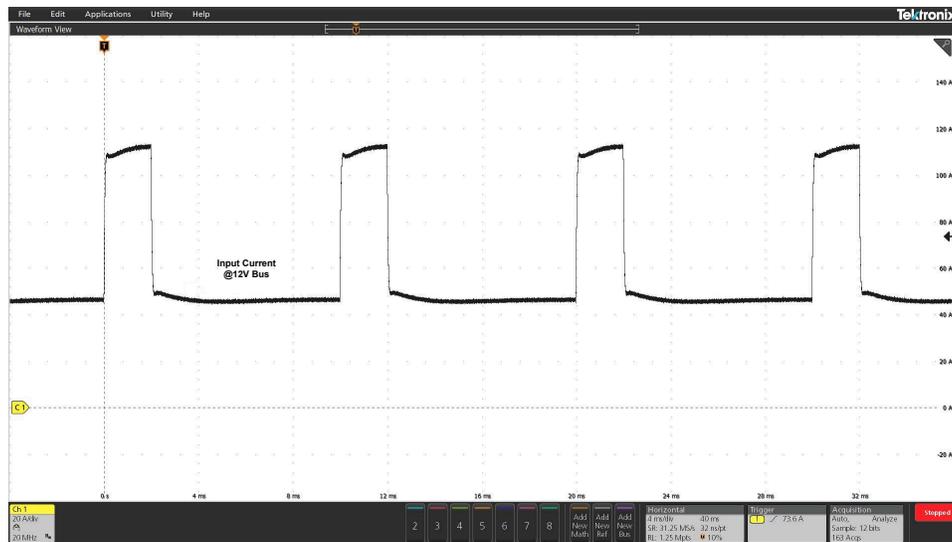


图 1-2. 在 12V 总线为具有 1.8V 输出的 VRM 供电时看到的典型加载瞬态曲线

## 2 传统电子保险丝器件的过流响应

传统的电子保险丝器件会持续监测流经它的电流，并向特定引脚提供电流输出。向该引脚连接适当电阻会产生电压，该电压与流经器件的电流成线性比例。将该电压与参考电压进行比较，以检测输出过流事件。参考电压可由用户配置。一旦电流传感电压 (通过外部电阻器配置) 超过电流限制参考电压阈值，内部电路将调节其门，以保持 MOSFET 上的恒定电流，并且内部故障计时器 (不可由用户配置) 启动。如果加载电流在固定故障计时器周期

内降至电流限制设置点以下，器件将恢复正常运行。否则，在持续过流事件发生时，器件将关闭。两个传统电子保险丝的过流响应如 图 2-1 和 图 2-2 所示。

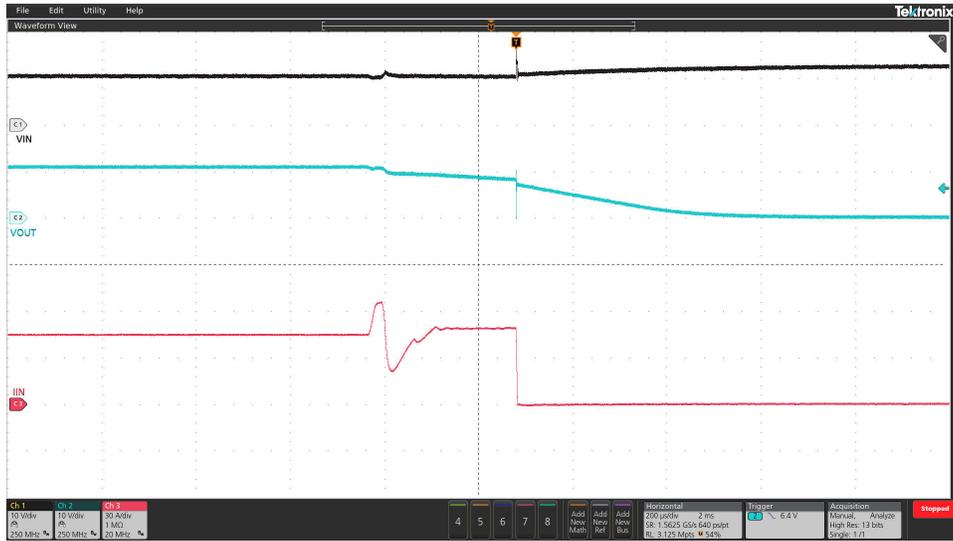


图 2-1. 传统电子保险丝 1 的过流响应

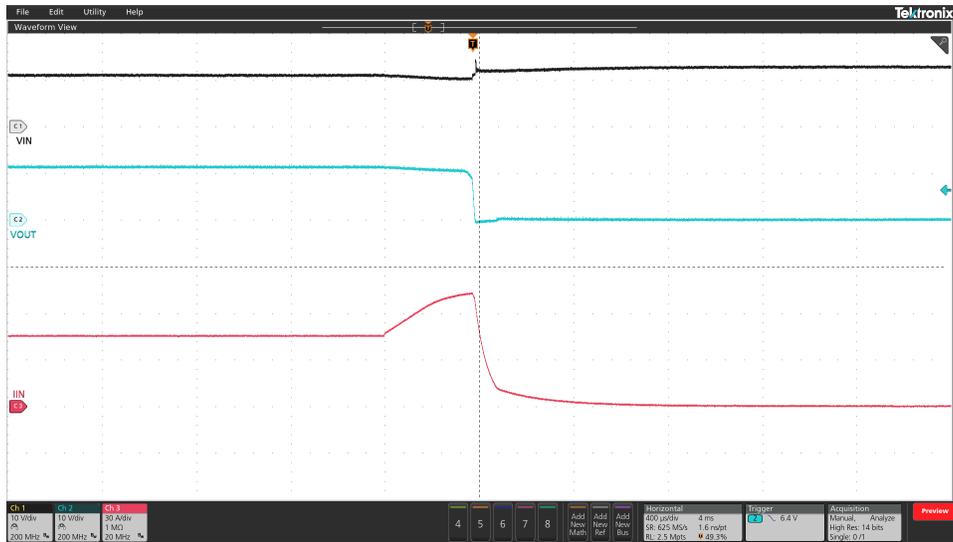


图 2-2. 传统电子保险丝 2 的过流响应

### 3 电流限制功能的挑战

传统电子保险丝的过流响应是电流限制，这意味着器件电流被限制为一个用户定义的或一个固定的故障计时器间隔的电流限制阈值。通常，过流保护 (OCP) 阈值设置为热设计电流 (TDC) 的 1.1-1.2 倍左右、以保护整个服务器电力输送系统和 PSU 免受因过度过热而出现的热通道的影响。如果加载瞬态的电流振幅超过 OCP 阈值，则上述器件不允许该瞬态电流从电源流入加载，因为它会受到限制。该解决方案是将 OCP 阈值设置为超过瞬态脉冲电流最大振幅，以避免器件在存在加载瞬态时错误关闭。图 3-1 和图 3-2 展示了一种传统电子保险丝中的这种行为。在这两种情况下，均施加了 100A 并持续 12ms 的加载瞬态，将其从 160A 转换为 12ms，然后恢复到 100A。然而，在图 3-1 中，OCP 阈值被设置为 120A，这是稳定状态电流 100A 的 1.2 倍。当加载瞬态振幅 (160A) 大于 120A 的 OCP 阈值时，器件将关闭。另外，在图 3-2 中，OCP 阈值被设置为 170A，这大于加载瞬态量级的 160A。因此，100A 的加载瞬态持续 12ms 变为 160A 并持续 12ms，然后恢复到 100A 直通。

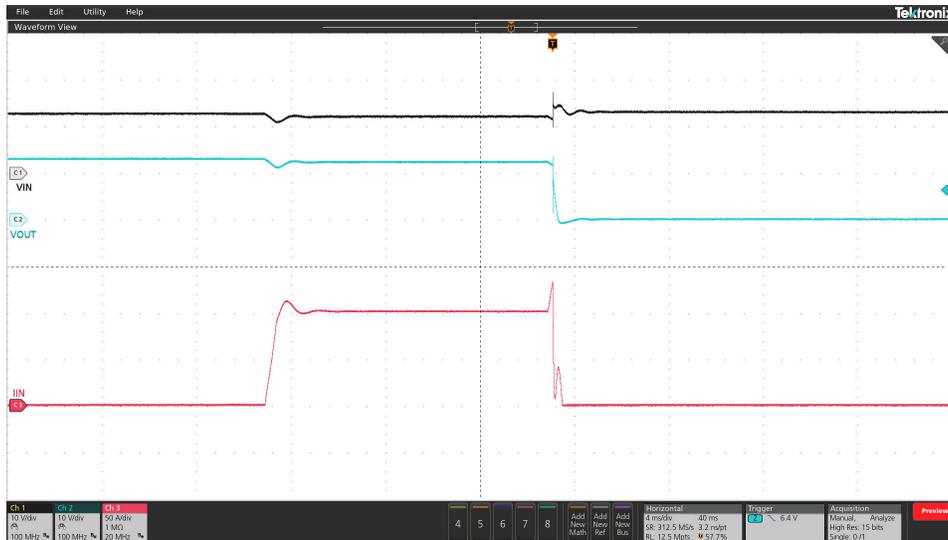


图 3-1. 传统电子保险丝 1 : 100A 的加载瞬态持续 12ms 变为 160A 并持续 12ms，然后恢复至 100A，OCP 阈值为 120A

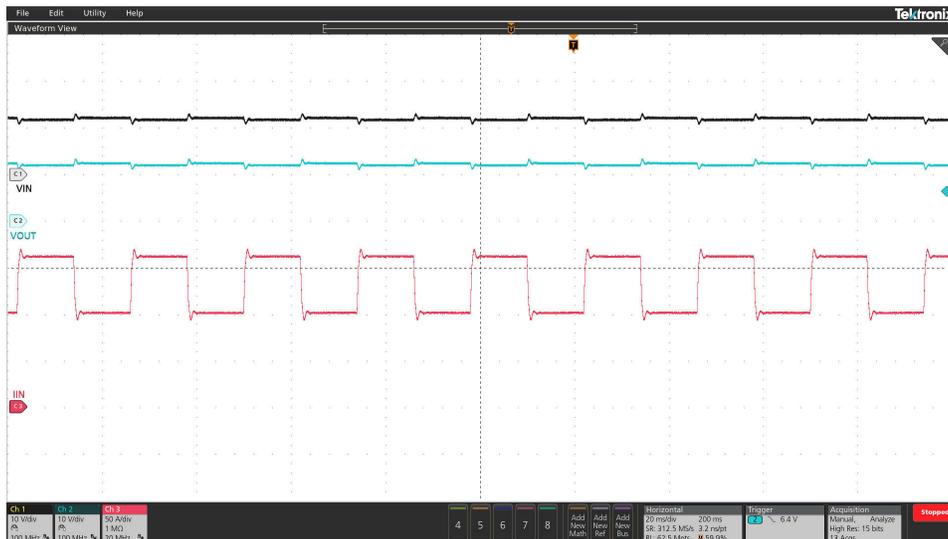


图 3-2. 传统电子保险丝 1 : 100A 的加载瞬态持续 12ms 变为 160A 并持续 12ms，然后恢复至 100A，OCP 阈值为 170A

然而，如下文所述，将 OCP 阈值提高至超过峰值脉冲电流电平是一项挑战。将 OCP 阈值增加到超过瞬态峰值脉冲电流电平，而不是将其设置为 TDC 电平的 1.1-1.2 倍，会使输入电源路径在峰值脉冲电流电平达到之前没有任

何过流保护，尽管它是一个瞬态加载。因此，服务器主板的输入 PSU 和配电系统必须按照瞬态峰值脉冲电流的连续电流额定值来设计，而不是按照热设计电流 (TDC) 来设计。这会增加整体系统成本和解决方案的尺寸，因为每个电源组件都必须额定为更高的电流值，或者需要更多的电源组件并联。这是处理系统增加的额定电流所必需的。由于系统设计为瞬态峰值脉冲电流的额定电流，但在占空比大于 90% 的 TDC 级别使用，因此系统利用率也会变得很差。输入 PSU 的稳定状态额定功率必须对应于瞬态峰值脉冲电流，而不是 TDC，因为在达到瞬态峰值脉冲电流的电流电平之前不存在过流保护。

## 4 使用 TI 高电流电子保险丝的建议设计

### 4.1 TPS25984、TPS25985、TPS25990 和 TPS1685 电子保险丝中的稳定状态过流保护

TPS25984、TPS25985、TPS25990 和 TPS1685 电子保险丝在稳定状态期间，若检测到输出过流情况，会在用户可调节的瞬态故障消隐间隔后执行断路器操作。此操作使设备能够在用户定义的短时间间隔内支持更高的峰值电流，同时确保在持续输出故障情况下提供可靠的保护。

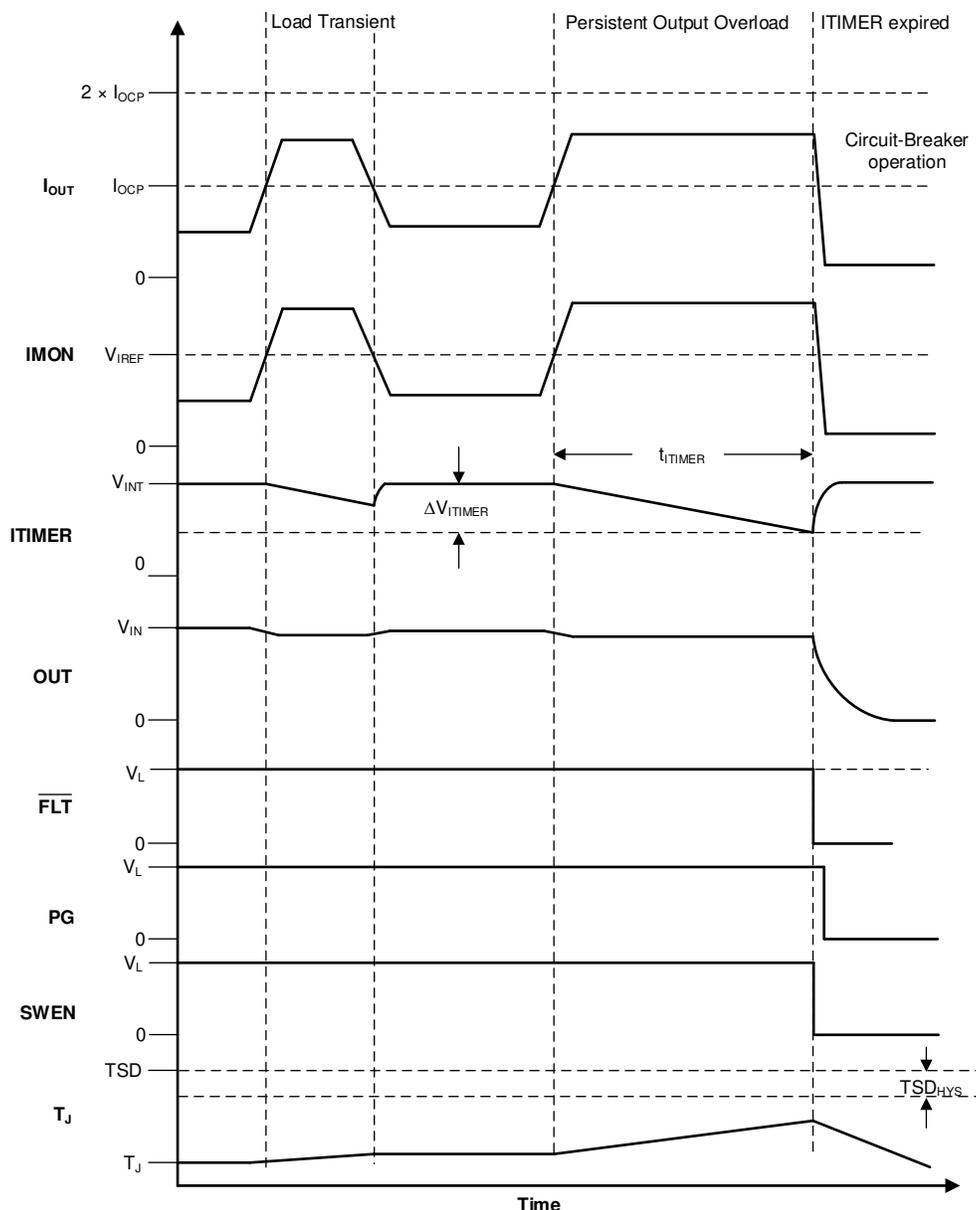


图 4-1. 稳定状态过流 (断路器) 响应

该器件不断检测输出加载电流并在 IMON 引脚上提供与加载电流成正比的模拟电流输出 ( $I_{IMON}$ )。这进而在相应的 IMON 引脚电阻器 ( $R_{IMON}$ ) 上产生与 [方程式 1](#) 成比例的电压 ( $V_{IMON}$ )。

$$V_{IMON} = I_{OUT} \times G_{IMON} \times R_{IMON} \quad (1)$$

其中  $G_{IMON}$  是电流监测器增益 ( $I_{IMON}: I_{OUT}$ )

通过将这个电压与 IREF 引脚上的参考电压进行比较，可以检测到过流情况。参考电压 ( $V_{IREF}$ ) 相应地设置过流保护阈值 ( $I_{OCP}$ )。

- 在独立或主工作模式下，内部电流源与外部 IREF 引脚电阻器 ( $R_{IREF}$ ) 相互作用以产生基准电压。也可以通过外部低阻抗基准电压源驱动 IREF 引脚，如 [方程式 2](#) 所示。

$$V_{IREF} = I_{IREF} \times R_{IREF} \quad (2)$$

- 在主器件和辅助器件并联的配置中，主电子保险丝或控制器驱动 IREF 引脚上的电压，为链中的所有辅助器件提供外部基准 ( $V_{IREF}$ )。

稳定状态期间的过流保护阈值 ( $I_{OCP}$ ) 可以使用 [方程式 3](#) 计算得出。

$$I_{OCP} = \frac{V_{IREF}}{G_{IMON} \times R_{IMON}} \quad (3)$$

检测到过流状况后，即加载电流超过编程设定的过流限制阈值 ( $I_{OCP}$ )，但低于可调整的短路阈值，( $I_{SFT}$  为  $2 \times I_{OCP}$ )，该器件开始使用一个约  $2.0 \mu A$  的内部下拉电流 ( $I_{TIMER}$ ) 来放电 ITIMER 引脚的电容器。如果在 ITIMER 电容器放电  $1.5V$  (典型值)  $\Delta V_{ITIMER}$  之前，加载电流降至断路器阈值以下，那么 ITIMER 会通过内部上拉至  $3.65V$  (典型值)  $V_{INT}$  电压进行复位，并且不会触发断路器动作。此操作允许短过载瞬态脉冲通过器件而不会使断路器跳闸。如果过流状况仍然存在，ITIMER 电容器将继续放电，并且在下降  $\Delta V_{ITIMER}$  之后，断路器操作会立即关闭器件。同时，ITIMER 电容器再次充电至  $V_{INT}$ ，以便在下一次过流事件发生之前处于默认状态。此操作可确保为每个过流事件提供完整的消隐计时器间隔。可使用 [方程式 4](#) 来计算所需过流阈值对应的  $R_{IMON}$  值。

$$R_{IMON} = \frac{V_{IREF}}{G_{IMON} \times I_{OCP}} \quad (4)$$

允许瞬态的持续时间可以通过在 ITIMER 引脚与接地之间使用适当的电容值来调整。瞬态过流消隐间隔可使用 [方程式 5](#) 计算得出。

$$t_{ITIMER}(ms) = \frac{C_{ITIMER}(nF) \times \Delta V_{ITIMER}(V)}{I_{ITIMER}(\mu A)} \quad (5)$$

[图 4-1](#) 展示了 TPS25984、TPS25985、TPS25990 和 TPS1685 电子保险丝的过流响应。器件因断路器故障而关闭后，它将保持锁定关闭状态 (锁定关闭型) 或在固定延迟后自动重启 (自动重试型)。

[图 4-2](#) 和 [图 4-3](#) 展示了 TPS25990 电子保险丝对瞬态过载事件和持续过载事件的响应。

[图 4-2](#)：器件处于稳定状态时，加载电流在 10ms 内从 50A 上升至 70A，然后再下降至 50A。OCP 阈值设置为 55A，过流消隐延迟设置为 15ms ( $OC\_TIMER = 0x89$ )

[图 4-3](#)：器件处于稳定状态时，加载电流从 50A 上升至 70A 的时间超过 15ms。OCP 阈值设置为 55A，过流消隐延迟设置为 15ms ( $OC\_TIMER = 0x89$ )

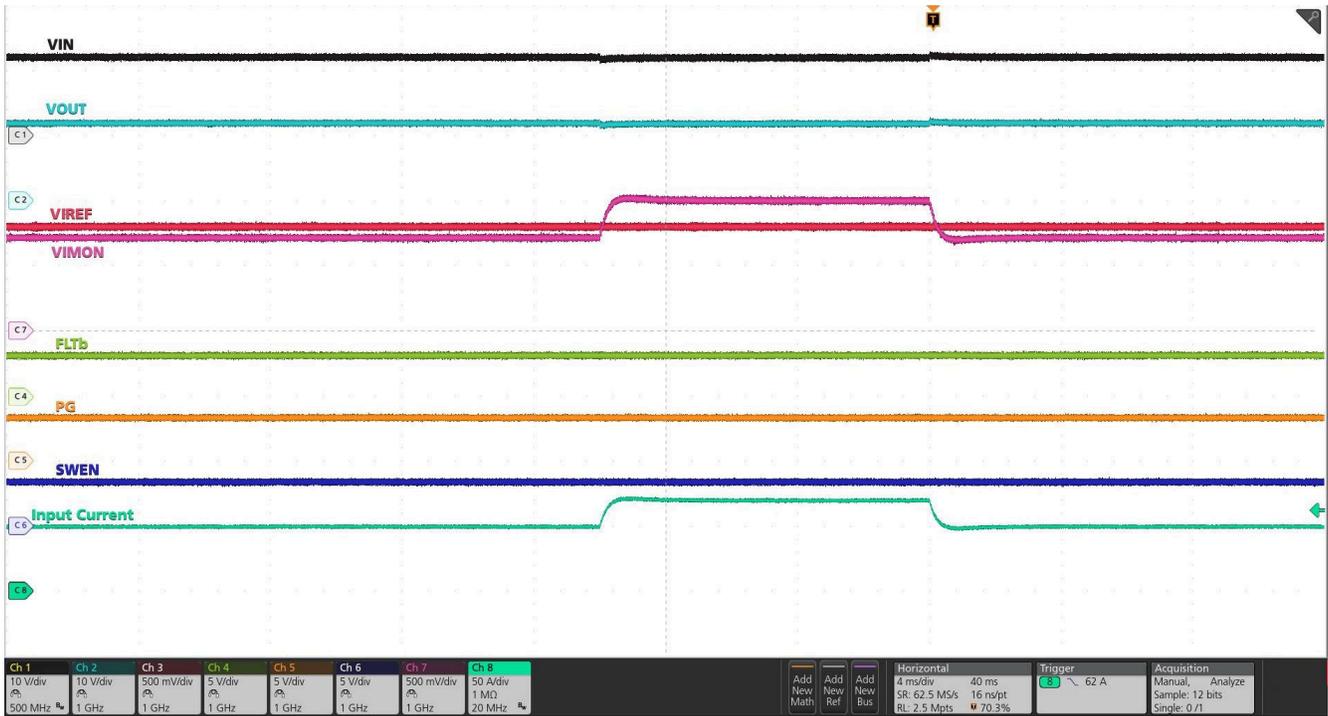


图 4-2. TPS25990 电子保险丝中的瞬态过流消隐



图 4-3. TPS25990 电子保险丝中的过流保护

## 4.2 设计指南

1. 给定以下参数，
  - a. 热设计电流 (TDC) 或连续最大稳定状态电流，
  - b. 瞬态峰值脉冲电流的最大振幅 (IMAX)，
  - c. 瞬态峰值脉冲电流的最大持续时间，

- 将可缩放快速跳变阈值 ( $I_{SFT}$ ) 设置为  $I_{MAX}$  的 1.2 倍左右, 以确保瞬态加载电流能顺畅流过,
- 过流阈值 ( $I_{OCP}$ ) 是  $I_{SFT}$  的一小部分, 如 [方程式 6](#) 所示。

$$I_{OCP} = k \times I_{SFT} \quad (6)$$

默认情况下, TPS25984、TPS25985、TPS25990 和 TPS1685 电子保险丝中的  $k$  值为 0.5。然而, 在 TPS25990 和 TPS1685 电子保险丝中, 它分别可以通过 PMBus 和引脚绑定由用户进行编程。之后, 使用 [方程式 4](#) 并考虑  $k$  的实际值来获得  $R_{IMON}$  电阻值。

- 故障计时器的持续时间需要设置为大于瞬态加载电流脉冲的最长持续时间, 该脉冲的振幅大于  $I_{OCP}$ 。可能的最长故障计时器持续时间约为 30ms。在 TPS25990 中, 故障计时器的持续时间可以通过 PMBus 进行编程, 而在其他三款电子保险丝中, 则可以通过在 ITIMER 引脚上放置一个陶瓷电容器来进行硬件编程。电容器值可通过 [方程式 5](#) 获得。
- 需要根据器件的 RMS 电流额定值和总系统电流的 RMS 值或 TDC 额定值来计算并联的电子保险丝数量。

## 5 热性能与持续瞬态加载电流

在存在瞬态加载电流的情况下, 器件结温升与流过它的均方根 (RMS) 电流的平方成正比, 而不是平均直流电流。结温的计算方法为 [方程式 7](#)。

$$T_J = T_A + (I_{RMS}^2 \times R_{DSon} \times R_{\theta JA}) \quad (7)$$

$T_J$ : 器件结温,

$T_A$ : 器件环境温度,

$I_{RMS}$ : 流经单个器件的电流的 RMS 值,

$R_{DSon}$ : 每个电子保险丝的导通电阻,

$R_{\theta JA}$ : 电子保险丝上的结温至环境温度热阻。

在存在瞬态加载情况下, 必须将器件结温限制为系统环境温度升高时 125°C 的最高建议工作温度。为了确保这一点, 要么必须通过改善热管理和 PCB 布局来降低  $R_{\theta JA}$  的值, 要么必须将并联器件的数量增加到下一个整数。为确保设备长期可靠运行, 避免电迁移效应的影响, 流经每个器件的瞬态峰值电流需接近其额定峰值电流 (例如, TPS25985 的额定值为 60A RMS 电流和 80A 峰值电流)。TPS25985 电子保险丝在承受 50A 瞬态加载持续 (100-X) ms 和 80A 瞬态加载持续 X ms 时的热性能如图 [图 5-1](#) 所示, 其中 X 为峰值电流作用时间, 单位为 ms。

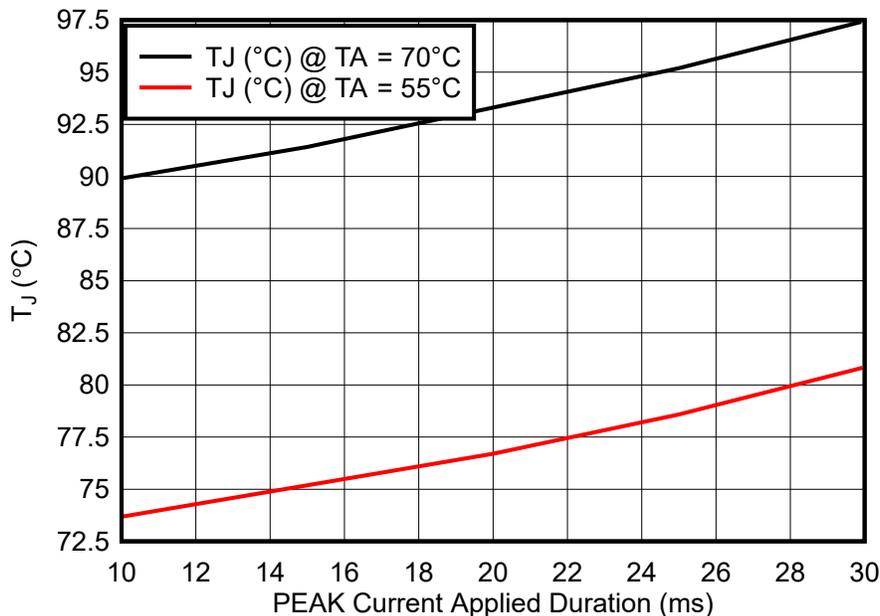


图 5-1. TPS25985 电子保险丝瞬态加载热性能

## 6 TI 电子保险丝设计带来的系统级优势

### 6.1 并联的电子保险丝数量较少

客户用例：

- VIN = 12V，
- TDC = 220A、和
- IMAX = 370A、12ms (最大)。

使用传统的电子保险丝时，考虑到 IMAX 顶部的 10% 裕度，最小过流保护设定点需要约为 400A。为了满足这一要求，需要并联八 (8) 个持续输出电流额定值为 50A (无气流) 的传统电子保险丝，因为在系统电流达到 400A 之前不存在过流保护。

使用 TI 的电子保险丝设计， $I_{OCP}$  阈值设置为 1.1 倍 TDC，从而变为大约 240A (220A x 1.1)。假设 k 为 0.5，则  $I_{SFT}$  约为 480A。一 (1) 个 TPS25990 (连续 RMS 电流额定值为 50A) 和最多三 (3) 个 TPS25985 (连续 RMS 电流额定值为 60A) 电子保险丝需要并联，以支持此客户用例。

使用 TI 电子保险丝时所需的电子保险丝数量减少一半。这降低了系统的物料清单 (BOM) 成本并在很大程度上提高了功率密度。

### 6.2 PSU 尺寸减小

在节 6.1 中提到的客户用例中，使用 TI 的电子保险丝设计，输入 PSU 的最小稳定状态电流额定值需要约为 240A。选择 **3.2kW M-CRPS**。此 PSU 的尺寸为 185mm (长) x 73.5mm (宽) x 39mm (高)。

使用传统电子保险丝时，输入 PSU 的最低稳定状态电流额定值需要约为 440A。3.2kW M-CRPS 不足以支持此电流。另一个 **2.2kW CRPS (DPS-2200AB-2)** 需要与 3.2kW M-CRPS 并联。DPS-2200AB-2 PSU 的尺寸为 265mm (长) x 73.5mm (宽) x 40mm (高)。采用传统电子保险丝设计时，PSU 总尺寸可以达到 265mm (长) x 147mm (73.5 x 2) (宽) x 40mm (高)，**这比采用 TI 电子保险丝器件的设计大约 2.9 倍。**

## 7 总结

本应用手册讨论了在企业服务器主板过流保护和瞬态过载状况下，使用 TI 高电流电子保险丝相对于其他现有电子保险丝或热插拔控制器设计的系统级优点。断路器机制和可编程过流消隐计时器功能可大幅降低总系统成本。它通过减少并联高载流功率元件的数量或其尺寸以及 PCB 覆铜线迹厚度来提高功率密度。这是因为系统的总 RMS 电流额定值降低了。使用 TI 的高电流电子保险丝设计，输入 PSU 额定值，可优化至与系统的 TDC 相匹配，而无需按照系统峰值脉冲电流额定值来设计。因此，系统电源利用率得到了显著提升。

## 8 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[TPS25984：具有准确、快速电流监测器的 4.5V 至 16V、0.8mΩ、70A 可堆叠电子保险丝数据表](#)。
- 德州仪器 (TI)，[TPS25985：具有准确、快速电流监测器的 4.5V 至 16V、0.59mΩ、80A 可堆叠紧凑型电子保险丝数据表](#)。
- 德州仪器 (TI)，[TPS25984Bx：具有准确、快速电流监测器的 4.5V 至 16V、0.8mΩ、70A 可堆叠集成式热插拔器件 \(电子保险丝\) 数据表](#)。
- 德州仪器 (TI)，[TPS25990：具有数字遥测控制器的 2.9V 至 16V、0.79mΩ、60A 电子保险丝数据表](#)。
- 德州仪器 (TI)，[TPS1685x 具有准确、快速电流监测器的 9V 至 80V、3.65mΩ、20A 可堆叠集成热插拔器件 \(电子保险丝\) 数据表](#)。

## 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、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。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  
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司