

Technical Article

借助行业首创的 48V 集成式热插拔器件 (电子保险丝) 为现代 AI 数据中心供电



Kshitiz Khatri



随着高性能计算和人工智能不断发展，数据中心需要高功率密度的高效解决方案来支持最新的中央处理单元、图形处理单元 (GPU) 和硬件加速器。然而，由于需要提高功率密度并转向 48V 电源架构来满足处理需求，这带来了新的挑战，尤其是在以下情况下：保持可靠性、效率和可扩展性的同时，管理大于 6kW 的功率级别。

不断提高的电源要求通常会导致解决方案尺寸更大、设计复杂，且故障检测和保护效率低下。此外，在管理高电流的同时，确保安全运行和更大限度地降低功率损耗也是一个重要问题。与分立式场效应晶体管 (FET) 结合使用的传统热插拔控制器在高功率应用中面临巨大的局限性。

为了应对这些挑战，TI 具有电源路径保护功能的 48V 热插拔电子保险丝器件旨在为数据中心应用提供可靠的紧凑型解决方案。与需要使用外部感应电阻器和电流传感放大器进行电流监测的方法不同，TPS1689 和 TPS1685 通过集成这些功能简化了设计，将解决方案尺寸缩减多达 50%，同时提供无缝可扩展性以支持高功率级别。

TPS1689 其中一项优势功能在于消隐计时器，它通过使系统区分峰值负载电流和实际故障情况来防止误跳闸。此功能可提高系统可靠性并避免不必要的关断。该器件还支持堆叠功能，以提高电流处理能力，从而使多个器件能够在高功率应用中协同工作。

用于故障记录的集成式黑盒、有保证的 FET 安全工作区、主动电流均流和运行状况监测可进一步提高系统恢复能力。TPS1689 采用业界通用封装，提供电源管理解决方案，确保可靠运行。

加强服务器保护并提升性能

消隐计时器在系统保护和性能优化之间实现了平衡，因此在企业服务器系统中具有优势。如图 1 中所示，此功能可在不触发断路器的情况下使短瞬态过载通过，从而确保 AI、GPU 和处理器密集型应用中常见的临时高振幅负载脉冲不会导致系统中断。但是，在持续过流事件期间，电子保险丝会立即关断电路。

其他优势包括：

- 成本优化。消隐计时器可更大幅度地降低对超大电源单元 (PSU) 的需求，并减少并联配置所需的电子保险丝数量。这可在确保可靠运行的同时，大大降低物料清单成本。
- 提高了功率密度。通过缩减高载流元件的数量和尺寸，可实现更紧凑的系统设计，释放宝贵的印刷电路板 (PCB) 空间并改善热管理。
- 灵活性和定制。通过可编程故障间隔，设计人员可以微调系统响应以匹配特定瞬态曲线，从而优化独特工作负载的性能。

Part doesn't shut off for short load transient (~1ms)

Part shuts off for persistent fault (>2.2ms)

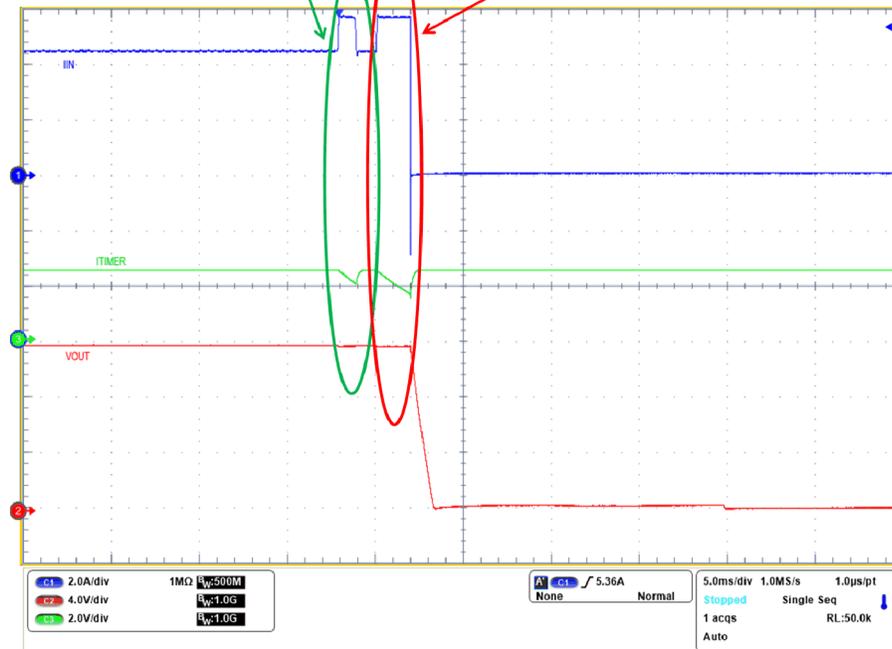


图 1. 用户定义的消费后的过流响应 (断路器)

可以将过流保护阈值设置为热设计电流的 1.1 倍，而不考虑最大瞬态负载 (通常为 1.7 倍)。传统设计需要 PSU 来支持峰值瞬态电流，与传统设计相比，此方法可降低 PSU 的尺寸和成本。这些优势使消隐计时器成为高性能服务器系统的关键功能。

先进的堆叠和电流均流解决方案

AI 驱动型处理器和服务器的功率需求不断提高，因此需要高效的配电系统，而智能电子保险丝在其中发挥了重要作用。由于漏电阻阻 ($R_{DS(ON)}$)、PCB 走线电阻和比较器阈值不匹配，电子保险丝的传统并联运行（如 图 2 中所示）带来了巨大挑战。这些不匹配会导致电子保险丝之间的电流共享不均（某些电子保险丝承载的电流比其他电子保险丝多），且通常会导致各个电子保险丝过早跳闸，即使系统总电流低于跳闸阈值也是如此。这种误跳闸会导致不必要的系统关断、降低可靠性，并加剧运行效率低下的情况。

为了应对这些挑战，TI 在利用互连 IMON 引脚的电子保险丝中引入了一种系统总电流限制方法。此方法将一个电子保险丝指定为主控制器来监测系统总电流。通过依赖于总电流而不是各个电子保险丝电流，该系统可避免路径电阻不匹配导致的误差，并确保系统仅在必要时跳闸，从而提高运行稳定性。

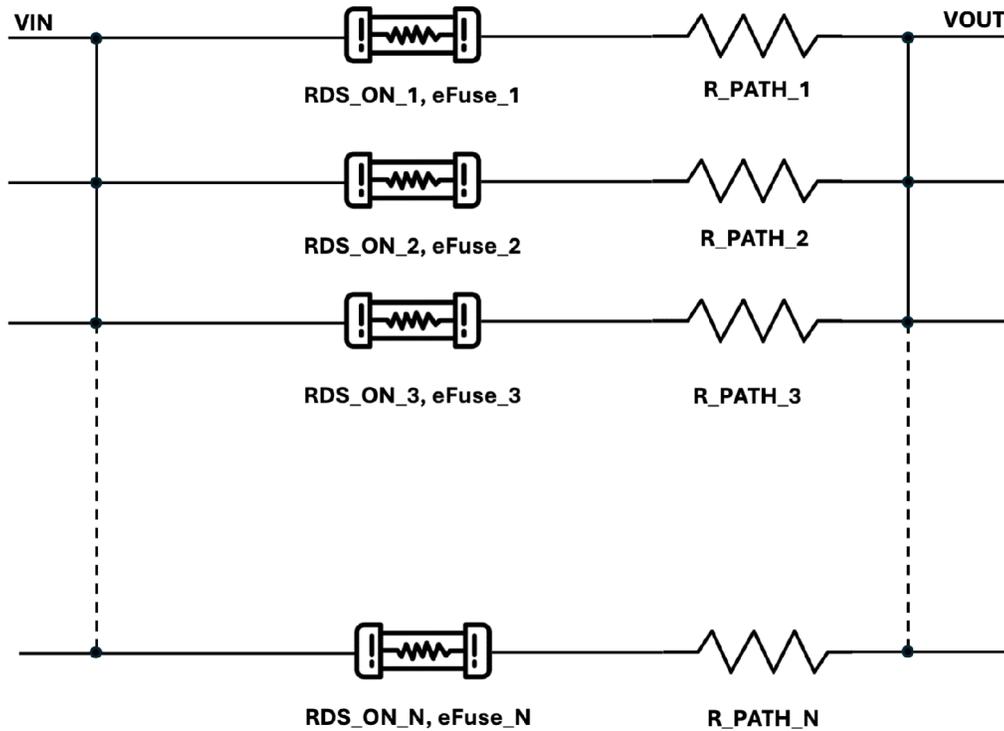


图 2. 电子保险丝并联堆叠，支持更高的电流负载

主动电流均流技术通过动态调整 FET 的 $R_{DS(ON)}$ ，在电子保险丝之间实现平衡电流均流，从而帮助实现高效配电。当一个电子保险丝承载不成比例的更高电流时，增大其 $R_{DS(ON)}$ 会略微使电流在所有器件中更均匀地重新分配。这种动态调节可更大限度地减小各个电子保险丝的热应力，从而在更长时间内提高系统可靠性。

在接近过流保护阈值时进行主动电流均流可确保其仅在必要时工作，以避免电流较低时出现不必要的功率损耗。通过在处于最佳阈值时启用主动电流均流，系统可在高电流运行期间均匀分配热应力，提高长期可靠性。

结语

热插拔电子保险丝器件具有更高的功率密度、简化的设计、增强的保护和成本优化功能，可为高性能计算应用带来更高效可靠的电源管理。消隐计时器和堆叠功能等功能的集成进一步增强了这些器件的适用性，可满足现代 AI 数据中心不断增长的功率需求。

其他资源

- 下载具有准确、快速电流监测器的 [TPS1685x 9V 至 80V、3.65mΩ、20A 可堆叠集成热插拔器件 \(电子保险丝\) 数据表](#)。
- 查看 [适用于电子保险丝 EVM 的 TPS1685 评估模块用户指南](#)。

商标

所有商标均为其各自所有者所有。

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