

Application Note

主动均流：TI 智能电子保险丝的先进电流分配功能



Amrit Jit, Harsh Singh, and Hameem Hamza

摘要

电子保险丝是集成式电源路径保护器件，越来越多地用于替代各种应用中的分立式前端保护电路，提供紧凑高效的设计。电子保险丝可满足高达 60A 的宽电流范围和高达 80V 的电压。但是，某些应用（例如服务器和通信设备）需要明显更高的电流，通常在几十到几百安培的范围内。为了满足这些需求，系统设计人员经常考虑并联电子保险丝来扩展系统以满足更高的电流要求并改善热管理。然而，并联连接的电子保险丝之间的电流分配仍然是一项挑战，会导致错误的系统关断或可靠性问题。本应用手册介绍了 TI 电子保险丝的主动均流 (ACS) 特性，并通过四个支持 80A 负载电流的电子保险丝和六个支持 100A 负载电流的电子保险丝示例介绍了设计和性能优势。

内容

1 简介.....	2
2 电子保险丝的可堆叠和并联运行面临的挑战.....	3
3 电子保险丝中的电流分配技术.....	4
3.1 具有独立电子保险丝过流限制的并联运行.....	4
3.2 具有系统总过流限制的并联运行.....	6
3.3 采用主动均流 (ACS) 的并联运行.....	7
4 总结.....	10
5 参考资料.....	10

插图清单

图 1-1. 48V 机架式服务器架构.....	2
图 2-1. 以并联配置连接的 N 个电子保险丝器件的数量.....	3
图 3-1. 并联连接且具有独立过流限制的电子保险丝器件支持 80A 负载电流.....	5
图 3-2. 并联连接且具有通用过流限制的电子保险丝器件支持 80A 负载电流.....	6
图 3-3. 四个无 ACS 的电子保险丝之间的均流.....	7
图 3-4. 并联连接且具有通用过流限制和 ACS 的电子保险丝器件支持 80A 负载电流.....	8
图 3-5. 4 个具有 ACS 的 TPS1685 电子保险丝之间的均流.....	9
图 3-6. 启动期间四个 TPS1685 电子保险丝之间的电流分配.....	9

表格清单

表 3-1. 设计参数.....	4
表 3-2. 四个并联的电子保险丝中的电流分配.....	4
表 3-3. 六个 TPS1685 电子保险丝在 $R_{DS(on)}$ 变化时的电流分配.....	10
表 3-4. 六个 TPS1685 电子保险丝在 $R_{DS(on)}$ 通过 ACS 校正后的电流分配.....	10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

人工智能 (AI) 的进步使由 AI 驱动的处理器和服务器的功耗和电流消耗出现了前所未有的激增。随着 AI 模型日益复杂，需要大量计算资源，电源需求也激增。与前代产品相比，现代 AI 处理器（例如图形处理单元 (GPU) 和张量处理单元 (TPU)）的功耗要高得多。由 AI 驱动的数据中心和服务器的耗电量呈现惊人增长，一些估计表明，在过去几年中，能源使用量增加了 20-30%。这一趋势给数据中心运营商带来了巨大的挑战，他们必须在计算性能与能效、热管理和环境可持续性之间取得平衡。为了缓解这些问题，研究人员正在探索卓越的设计，包括先进的冷却系统、低功耗芯片设计和新型存储器架构，以确保在不影响地球资源的情况下实现 AI 的变革潜力。

图 1-1 展示了 48V 机架式服务器架构以及数据中心和服务器机房中常用的配电设计，可为服务器和其他器件高效供电。由于此架构能够最大限度地减少能量损耗，最大限度地提高功率密度和优化整体系统效率，因此得到了广泛采用。TI 的高电流电子保险丝系列器件 TPS1685、TPS1689、TPS25984、TPS25985 为器件提供输入电源路径保护，例如浪涌电流管理、输入欠压、输入过压、上电至输出短路、过流、输出热短路等。电子保险丝放置在 PSU 和电压模块 (VRM) 的功率级以及其他终端负载之间。

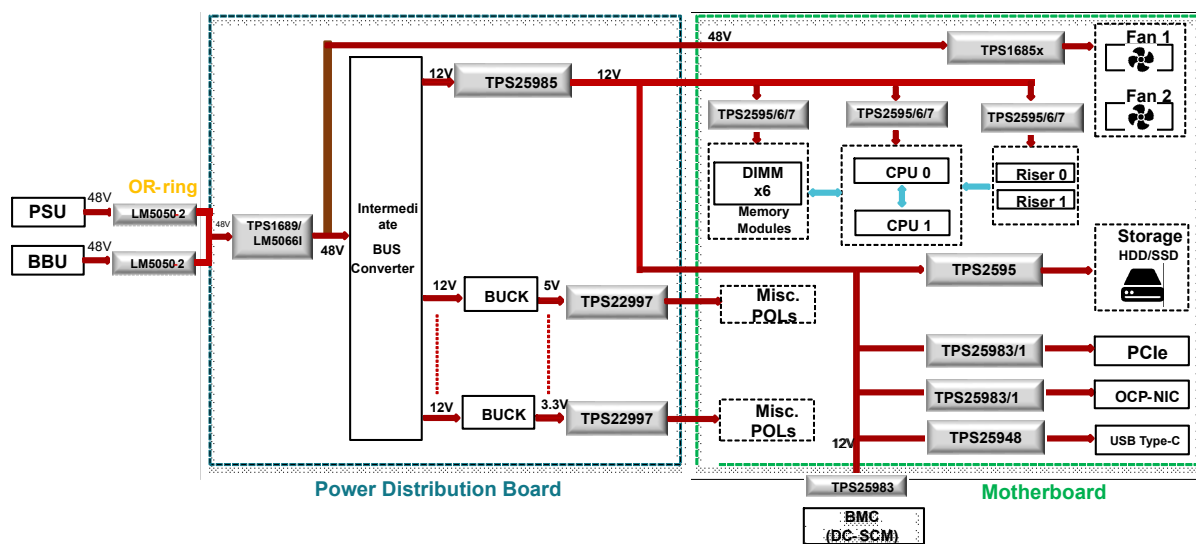


图 1-1. 48V 机架式服务器架构

2 电子保险丝的可堆叠和并联运行面临的挑战

在该应用中，考虑使用 **TPS1685** 来实现并联运行。当电子保险丝在并联配置下运行时，确保电子保险丝之间的电流平衡是一项主要挑战。成功的并联运行确保在稳态下并联器件之间的电流均衡。**图 2-1** 展示了以并行配置连接的 N 个电子保险丝器件。输入和输出端子均各自连接在一起。

传统的可堆叠电子保险丝独立运行，每个都有预定义的跳闸阈值，其计算方法是将系统的总阈值除以电子保险丝数量，如 **方程式 1** 所示。这种去中心化的方法意味着每个电子保险丝无法感知其他电子保险丝的状态或操作。

$$I_{threshold} = \frac{I_{total}}{N} \quad (1)$$

在一种设置中，电子保险丝的规格完全匹配，并且每个电子保险丝路径中的 **PCB** 布线电阻完全相等，该设计效果良好，并在目标系统阈值下精确跳闸。但是，当电子保险丝的 **RDSon** 和比较器阈值或基准电压不匹配以及 **PCB** 布线电阻不匹配时，具有单独过流阈值的电子保险丝可能会在不同的阈值下跳闸。具有较低 **RDS(on)**、路径电阻和阈值的电子保险丝跳闸更快，即使系统总负载电流低于过流阈值。这会降低系统总过流阈值，从而导致正常运行期间出现误跳闸。

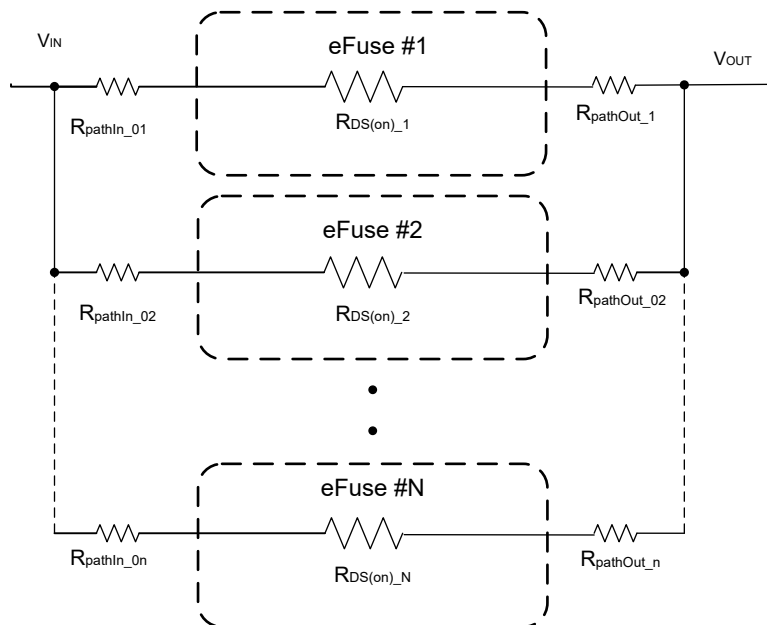


图 2-1. 以并联配置连接的 N 个电子保险丝器件的数量

3 电子保险丝中的电流分配技术

本节通过一个系统示例来介绍不同的电流分配技术，以评估系统性能、长期可靠性和有效的电流分配。

表 3-1 显示了 58V 电压轨应用的系统示例，其中并联了四个 TPS1685 电子保险丝以支持 80A 负载电流。在每个电子保险丝路径中引入了不同的路径阻抗，以模拟由于布线长度不匹配导致的 $R_{DS(on)}$ 和路径阻抗不匹配的实际情况。

表 3-1. 设计参数

设计参数	示例值
输入电压范围 (VIN)	58V
最大直流负载电流 (IOUT (max))	80A
并联的电子保险丝数量	4
最大输出电容 (CLOAD)	3mF
$R_{DS(on)}$	3.65m Ω
路径阻抗_1	0 Ω
路径阻抗_2	0.5m Ω
路径阻抗_3	0.5m Ω
路径阻抗_4	1m Ω
环境温度	25°C

3.1 具有独立电子保险丝过流限制的并联运行

图 3-1 展示了四个具有 20A 单独过流阈值的电子保险丝并联连接，以在 58V 服务器电压轨中分担 80A 负载电流。在稳态运行期间，电流分配由并联的电子保险丝器件之间的 $R_{DS(on)}$ 失配决定。漏源电阻 ($R_{DS(on_min)}$) 最低的器件与其他器件分担最高电流 (IMAX)。如 **表 3-1** 所示，引入了实际的路径阻抗，以显示电子保险丝中的电流分配。

通过每个电子保险丝的电流可以使用 **方程式 2** 来计算。

$$I_{eFuse_N} = I_S \times \frac{R_{Total\ system}}{R_N} \quad (2)$$

表 3-2. 四个并联的电子保险丝中的电流分配

电子保险丝	有效电阻 (R_{DS_ON} + 路径电阻)	电流分配
eFuse_1	3.65m Ω	22.57A
eFuse_2	4.15m Ω	19.85A
eFuse_3	4.15m Ω	19.85A
eFuse_4	4.65m Ω	17.72A

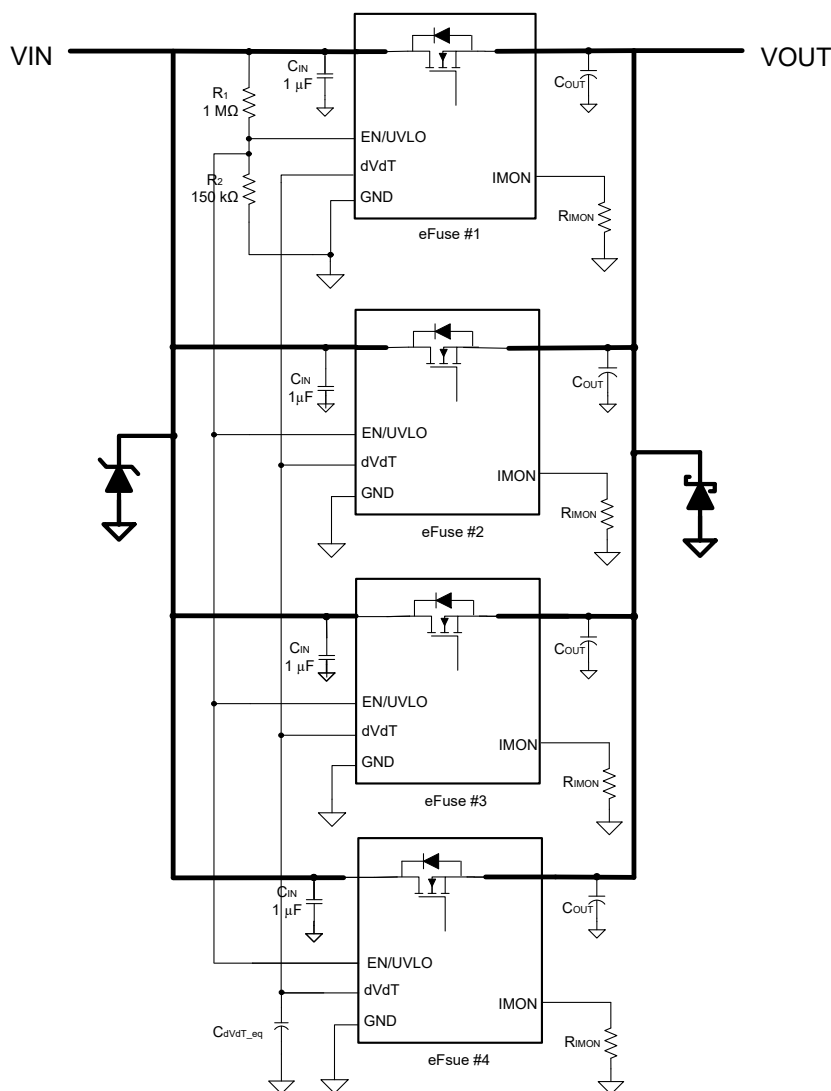


图 3-1. 并联连接且具有独立过流限制的电子保险丝器件支持 80A 负载电流

根据表 3-2 中所示的有效电阻和电流分配，可以看到 eFuse_1 消耗超过 20A 的电流，这会触发第一个电子保险丝，随后触发其他并联连接的电子保险丝跳闸。因此，系统将在远低于 80A 时关断。

局限性

为了缓解电子保险丝的不准确性，系统设计人员必须从以下选项中选择：

1. 过度设计电源 (PSU)

提高系统跳闸阈值来适应潜在的电子保险丝误差会导致电源单元 (PSU) 过大，从而导致资源浪费、生产成本更高、功耗增加、系统效率降低，并且需要更多的并联电子保险丝等额外元件来确保安全运行。

2. 限制系统性能

将负载限制在系统跳闸阈值以下，以防止误跳闸。人为限制系统功能，以适应电子保险丝的不准确性，从而导致系统吞吐量降低和性能下降。

3.2 具有系统总过流限制的并联运行

为了避免 节 3.1 中提到的问题，TI 的电子保险丝器件采用了一种新的过流保护方法。这些电子保险丝器件取决于系统总电流，而不是各个器件的电流。所有 IMON 引脚都连接到 R_{IMON_eq} 以设置系统总电流，如 图 3-2 所示。这消除了因器件和路径之间不匹配而导致过流阈值降低的问题。

将系统跳闸阈值保持在高于系统最大电流可避免不必要的电子保险丝跳闸。然而，如 表 3-2 所示，通过电子保险丝的电流分配是不均匀的。eFuse_1 继续承载比电子保险丝工作电流更高的电流。

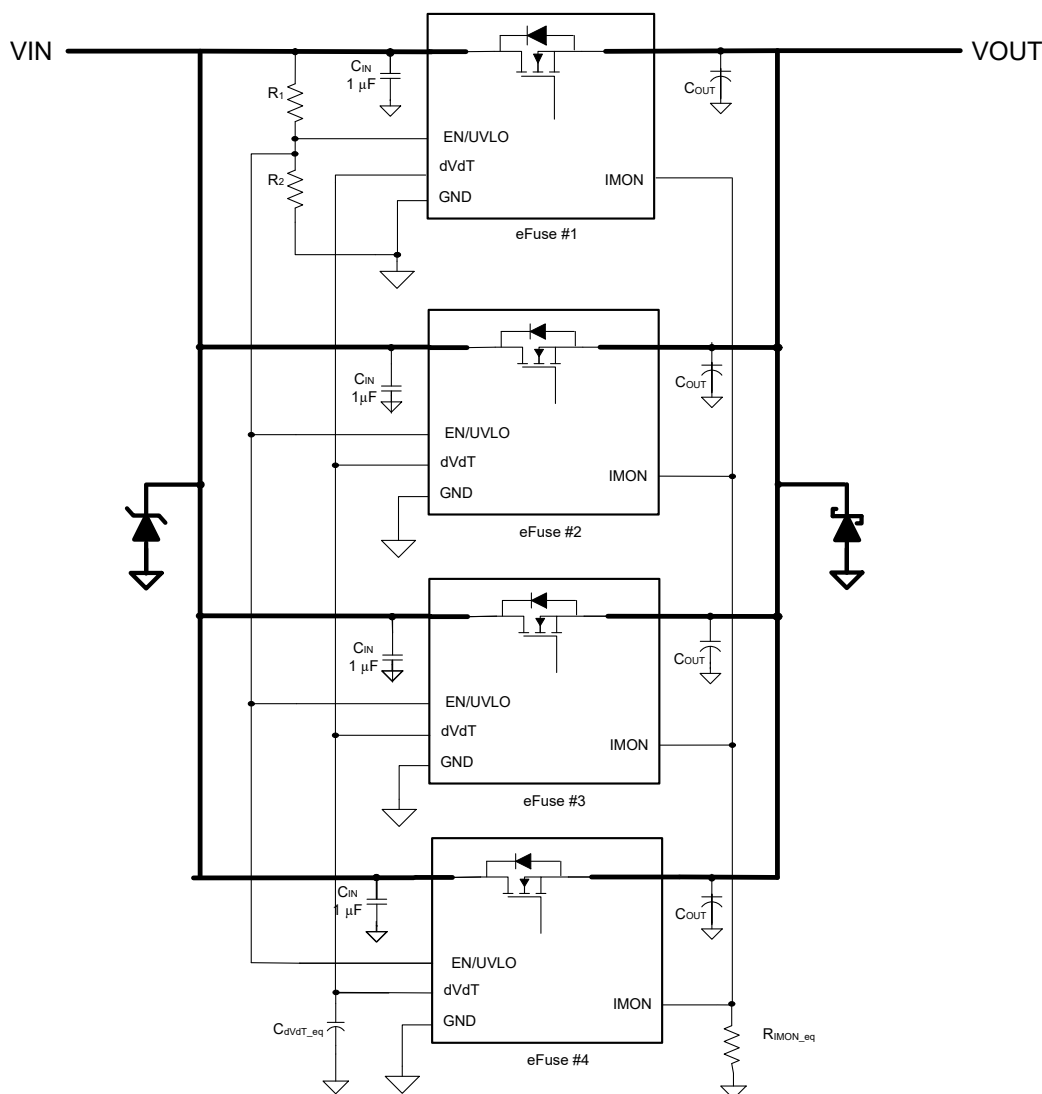


图 3-2. 并联连接且具有通用过流限制的电子保险丝器件支持 80A 负载电流

为了评估性能，负载电流以 2A 的步长增加，如 图 3-3 所示。由于路径电阻不匹配，可以看到电子保险丝承载的电流分配不均匀。在 图 3-3 中，每个电子保险丝的电流都保持在较高水平，因此器件不会进入 ACS 状态。



图 3-3. 四个无 ACS 的电子保险丝之间的均流

备注

TPS1685 的 ACS 技术如 节 3.3 中所述，可以通过使 ACS 阈值远高于电子保险丝的单個额定电流来禁用该技术。TPS1685 设计计算器可用于确定 R_{ILIM} 值。

局限性

电子保险丝之间的不均流

当电子保险丝器件以最大额定电流运行时，各个电子保险丝之间的电流分布不均会导致不同的应力水平。那些承载较高电流的电子保险丝器件面临更大的热应力和电应力。这可能会导致过早失效、过热和劣化，甚至可能超过 PCB 布线或过孔中的额定电流。因此，系统可靠性降低，维护成本增加，并且可能会发生系统停机，从而最终缩短 PCB 的使用寿命。

3.3 采用主动均流 (ACS) 的并联运行

为了解决 节 3.2 中所述的问题，TI 电子保险丝采用了 ACS，这在电流超过特定阈值时会触发。主动均流环路通过调节 FET 的 R_{dson} 来工作。承载更大电流的电子保险丝会略微增大 R_{dson} ，以降低电流，并允许链中的其他器件承载更大电流，从而实现电流的重新分配或平衡。

将 ACS 阈值设置过低会增加路径中的总电阻，从而在较低电流下不必要地增加功率损耗或自发热。同时，这在长期可靠性方面没有任何益处。

对于每个器件，主动均流阈值需要设置为最大额定直流电流。最佳选择是将其设置为接近每个器件的过流保护阈值。请注意，这是过流阈值，不受失配的影响。这确保了一旦系统负载电流开始接近最大直流电流，主动均流就会启动。如果系统在该区域长时间运行，从长期可靠性的角度来看，这尤其有用。一旦负载电流进一步增加到超过该值（在负载瞬态或故障期间），则会停用主动均流环路，而器件转而依赖过流保护电路（配有消隐计时器）。

器件进入主动均流的电流阈值取决于 V_{REF} 和 R_{ILIM} 值。TPS1685 设计计算器可用于确定 R_{IREF} 、 V_{IREF} 和 R_{ILIM} 值。

方程式 3 用于根据 ACS 阈值确定 R_{ILIM} 电阻。

$$R_{ILIM} = \frac{1.1 \times V_{IREF}}{3 \times G_{ILIM} \times I_{LIM(ACS)}} \quad (3)$$

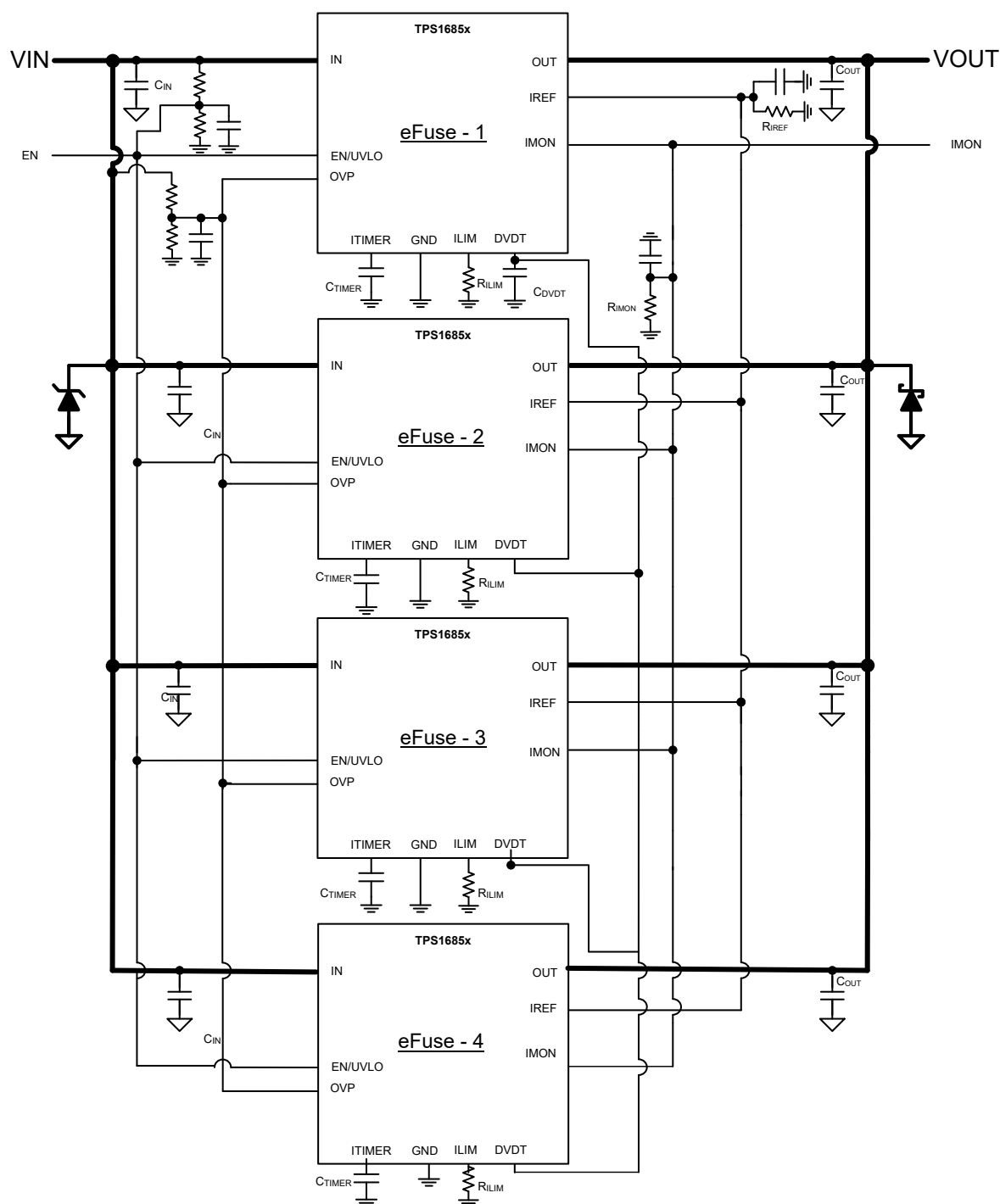


图 3-4. 并联连接且具有通用过流限制和 ACS 的电子保险丝器件支持 80A 负载电流

为了评估性能，负载电流以 2A 的步长增加，如 图 3-5 所示。由于路径电阻不匹配，可以看到电子保险丝在电流阶跃期间最初承载的电流分配不均匀。可以看到流经各个电子保险丝的电流与 ACS 趋于一致。

此波形是使用如 表 3-1 中所述的系统参数获取的。

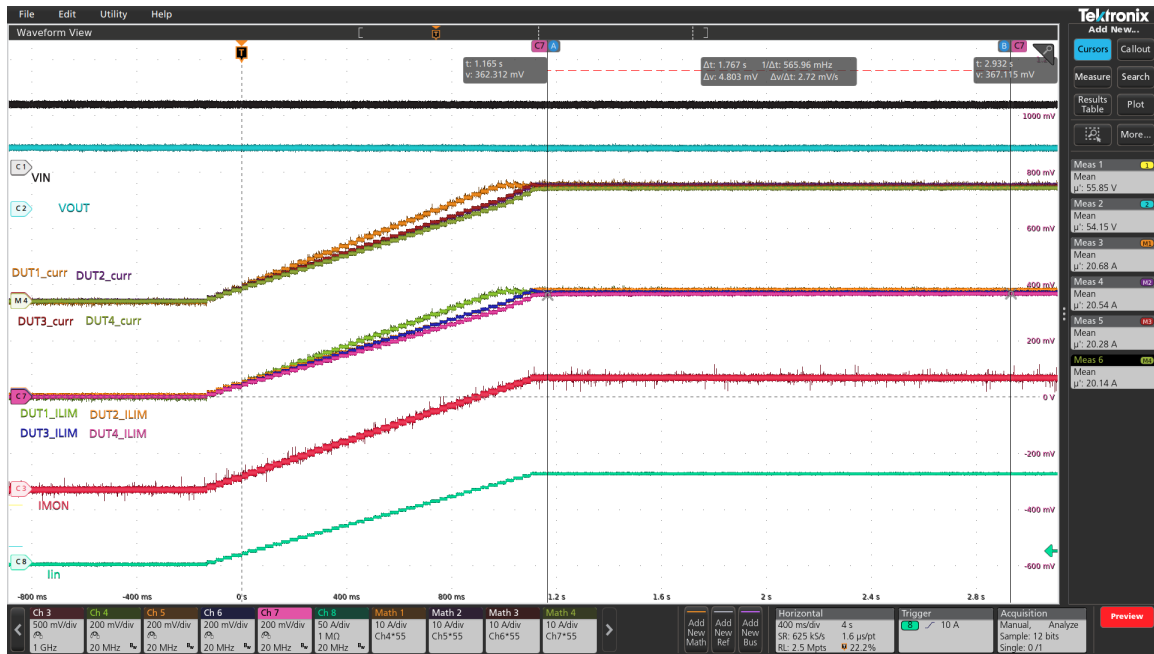


图 3-5. 4 个具有 ACS 的 TPS1685 电子保险丝之间的均流

TPS1685x 在启动期间实施专有的电流平衡机制，从而允许并联连接的多个 TPS1685x 器件分流浪涌电流并将热应力分散到所有器件。此特性有助于所有器件成功完成启动，避免某些电子保险丝过早进入热关断状态。这增加了并联链的浪涌电流能力。改进的浪涌性能有助于在高电流平台上支持非常大负载电容器，而不会影响浪涌时间或系统可靠性。



图 3-6. 启动期间四个 TPS1685 电子保险丝之间的电流分配

六个具有 ACS 的并联电子保险丝器件中的电流分配

本示例讨论了六个 TPS1685 电子保险丝并联连接，以满足 100A 系统电流要求。在具有准确、快速电流监测器的 TPS1685x 9V - 80V、3.65mΩ、20A 可堆叠集成热插拔（电子保险丝）数据表中，典型 $R_{DS(on)}$ 为 3mΩ，最高可达 6mΩ。表 3-3 显示了六个并联连接的电子保险丝器件在最大系统电流为 100A 时 $R_{DS(on)}$ 变化的示例。电子保险丝之间的电流分配如表 3-3 所示。eFuse_1 电流可高达 23.07A，比电子保险丝的建议工作电流高 15%。

ACS（主动均流）调节高电流器件的 $R_{DS(on)}$ 以均匀分配电流。可以使用 TPS1685 设计计算器设置该电流的 ACS 阈值。以下是启用了 ACS 且器件的 ACS 阈值设置为 20A 时，各个电子保险丝的电流。表 3-4 显示了启用 ACS 后的 $R_{DS(on)}$ 变化及电流分配。eFuse_2、eFuse_3、eFuse_4、eFuse_5 和 eFuse_6 的 $R_{DS(on)}$ 没有变化，而 eFuse_1 的 $R_{DS(on)}$ 增加 30%，使电流分配更加均匀。启用 ACS 后，eFuse_1 上的电流从 23.07A 降至 18.75A，应力均匀重新分配，eFuse_1 的寿命提升约 2 倍（可使用 Black 方程计算）。考虑到第一个故障点决定了系统可靠性，这使得系统有效寿命提升 2 倍。

表 3-3. 六个 TPS1685 电子保险丝在 $R_{DS(on)}$ 变化时的电流分配

eFuse_N	eFuse_1	eFuse_2	eFuse_3	eFuse_4	eFuse_5	eFuse_6
$R_{DS(on)}$	0.0035 Ω	0.0055 Ω	0.005 Ω	0.0045 Ω	0.006 Ω	0.0055 Ω
最大电流	23.07A	14.7A	16.15A	17.9A	13.46A	14.7A

表 3-4. 六个 TPS1685 电子保险丝在 $R_{DS(on)}$ 通过 ACS 校正后的电流分配

eFuse_N	eFuse_1	eFuse_2	eFuse_3	eFuse_4	eFuse_5	eFuse_6
$R_{DS(on)}$	0.00455 Ω	0.0055 Ω	0.005 Ω	0.0045 Ω	0.006 Ω	0.0055 Ω
最大电流	18.75A	14.7A	15.5A	17.06A	14.2A	15.5A

4 总结

并联电子保险丝配置还可帮助系统设计人员改进热管理，因为功率损耗分散至多个器件。本应用手册介绍了四个 TPS1685 器件和六个 TPS1685 器件采用主动均流 (ACS) 并联运行，从而满足 80A 和 100A 的电流分配和保护要求。然而，这种方法可以轻松扩展到其他电流水平。

5 参考资料

- 德州仪器 (TI)，使用并联电子保险丝实现 20A 电路保护和空间效率，应用报告
- 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。
- 德州仪器 (TI)，具有准确且快速电流监测器的 TPS25985x 4.5V 至 16V、0.59mΩ、80A 可堆叠电子保险丝，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