

电源开关瞬态保护设计，实现稳健可靠的电源路径保护

Rakesh Panguloori
Applications manager

Kunal Goel
Applications engineer

简介

现代电子系统中的元件集成通过增加功能来提高性能。大多数此类系统使用需要保护的敏感且昂贵的电子器件（现场可编程门阵列、专用集成电路和微处理器）。

保险丝、正温度系数电阻器、二极管和分立式电路（包括保险丝、金属氧化物半导体场效应晶体管和二极管）等传统保护解决方案不准确，响应速度较慢且缺乏可配置性和可重复性。因此，在许多应用中，使用电子保险丝和热插拔解决方案的有源电路保护已开始取代分立式前端保护电路 [1]、[2]。

但是，有源电路保护电子保险丝通常需要额外的保护，以保护它们免受瞬态事件的影响。最常见的瞬态事件包括热插拔、电流突然中断、电源浪涌、硬开关和反向电压。

任何此类瞬态事件都会在器件上造成电过应力，从而导致故障。在本文中，我们将讨论电气过应力 (EOS) 和 200A 电子保险丝企业服务器应用中瞬态保护元件的设计过程，包括放置和印刷电路板 (PCB) 布局注意事项。

了解 EOS

ESD 行业委员会将**电气过应力 (EOS)** [3] 定义为“当器件两端的电压、流经器件的电流或器件耗散的功率中的任何一个超过其最大限值，导致器件立即损坏或出现故障，或者造成潜在损坏，从而致使其使用寿命出现不可预测的缩短的情况。”在这些情况下，过电压会打开意外的电流路径，例如导致二极管发生正向或反向击穿，或使集成电路 (IC) 内部的氧化层达到击穿电压。一旦过压引发意外的电流路径，产生的电流就会造成损坏，包括硅材料熔化、金属互连熔断、封装材料热损坏，以及键合线熔断，从而导致电致物理损坏 (EIPD)。

可以将 EOS 与特定于器件额定电压的绝对最大额定值相关联：

- 区域 A：安全工作区。
- 区域 B：不保证器件功能或参数规范。尽管预计不会出现物理损坏，但延长运行时间可能会存在可靠性问题。
- 区域 C：超过绝对最大额定值，器件寿命会严重缩短，并存在潜在失效风险。
- 区域 D：预计会立即遭受物理损坏。

如 **图 1** 所示，当器件在超出绝对最大额定值运行时，应预料到会出现问题。因此，必须采取保护措施来抑制超过绝对最大额定值的瞬态过电压。

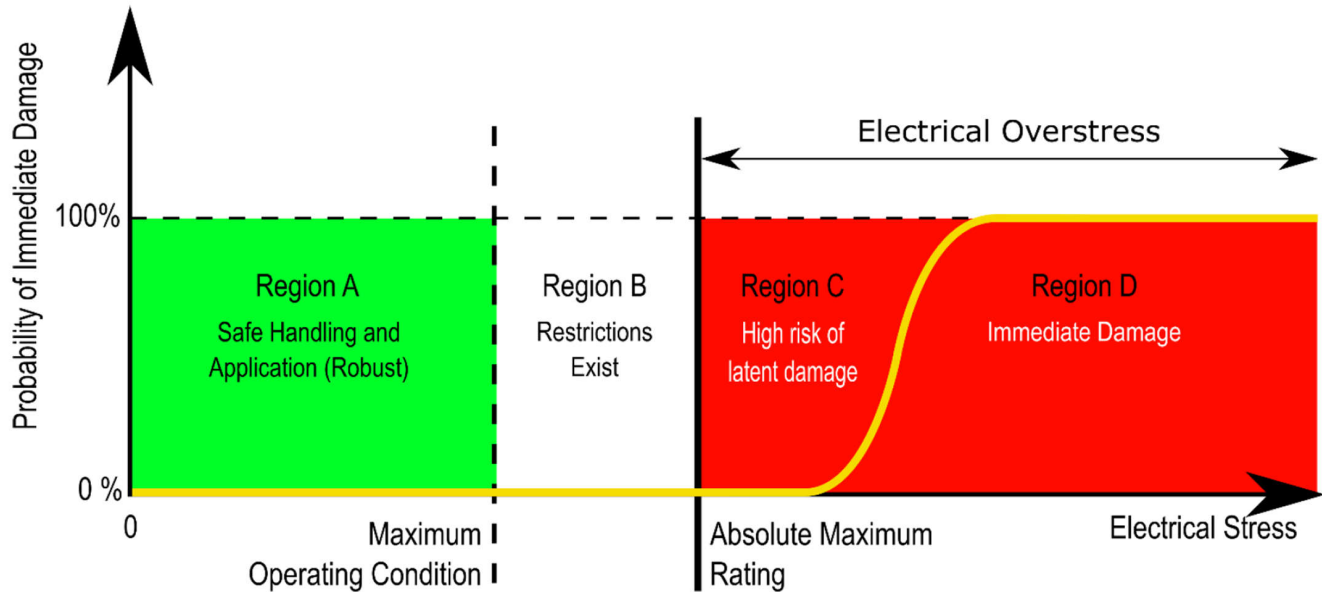


图 1. 将绝对最大额定值解释为 EOS。

企业服务器系统示例

电子保险丝广泛用于前端的机架式服务器模块，以提供输入保护并实现热插拔功能。**图 2** 展示了机架式服务器的典型配电架构，其中输入来自 12V 背板，然后从电子保险丝分配到所有下游负载。电源路径涉及背板、PCB 线路和接口连接器，会引入寄生电感 (L)，进而在故障事件期间产生意外的瞬态电压。

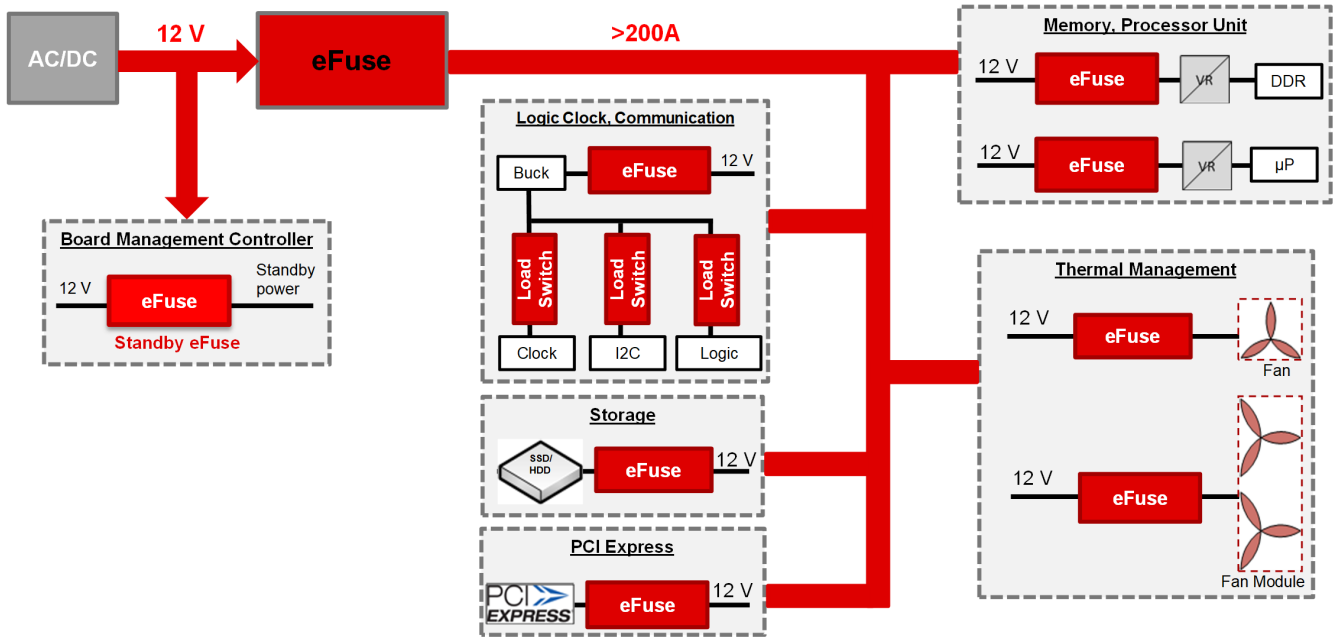


图 2. 12V 机架式服务器配电的典型方框图。

我们来定量分析 L 对电子保险丝的影响，如 图 3 中所示。在输出短路的情况下，电子保险丝会在 1μs 内瞬间将大量电流从大约 200A（过流）中断到 0A（关断以实现保护），从而导致较大的电流瞬态 (di/dt)，如 方程式 1 所示：

$$di/dt = (0A - 200A)/1\mu s = -2 \times 10^8 A/s \tag{1}$$

此电流将被捕获为寄生电感中的能量，并产生浪涌，表示为 方程式 2：

$$V_L = L \times di/dt = 100nH - 2 \times 10^8 A/s = -20V \tag{2}$$

-20V 浪涌将与 12V 输入电源串联，并将有效地产生 32V 正电压峰值，超过德州仪器 (TI) TPS25984B 电子保险丝的 20V VIN 绝对最大额定值。同样，输出电感会在输出端产生负电压峰值。

为防止出现这种情况，瞬态电压抑制器 (TVS) 二极管将钳制正极侧的电压，而低正向电压续流肖特基二极管将钳制负极侧的电压。为了确保提供可靠的系统保护，必须仔细选择这些元件。

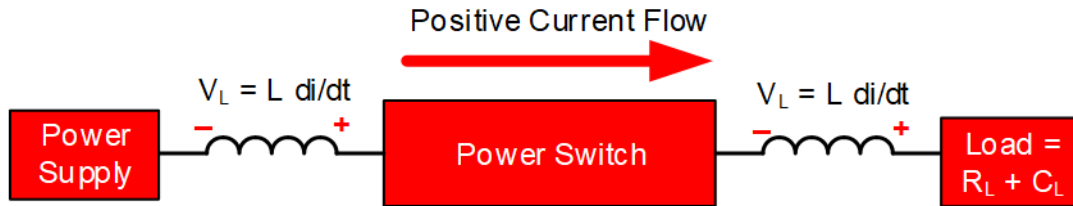


图 3. 电源开关中故障电流突然中断引起的电感反冲电压。

TVS 二极管选择

TVS 二极管旨在保护电子元件免受电压峰值的影响。一旦二极管上的电压超过雪崩击穿电势，TVS 二极管就开始工作。图 4 是 TVS 二极管的电流 - 电压曲线图。

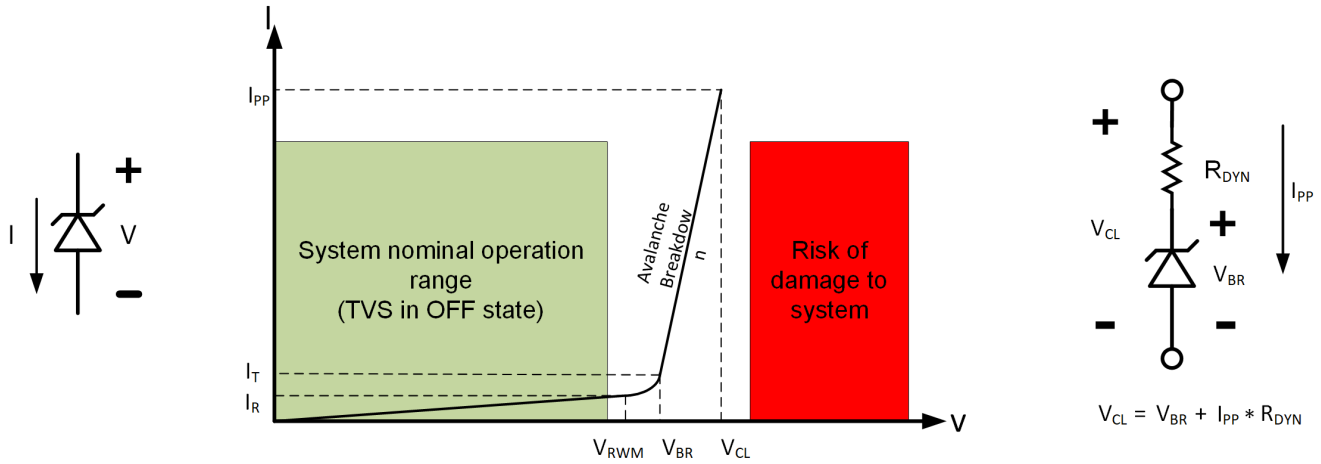


图 4. TVS 二极管特性。

如图 4 所示，最终钳位电压是 TVS 二极管分流的电流及 TVS 二极管动态电阻 (R_d) 的函数。同样，动态电阻是二极管封装尺寸和 TVS 二极管分流电流的持续时间 (t_p) 的函数。

例如，SMAJ 二极管 (13.52mm^2) 的 R_d 高于 SMBJ 二极管 (19.44mm^2)，因此在给定的分流电流下，SMAJ 二极管的钳位电压会更高。

使用这些 R_d 值来计算钳位电压，这些值可从 TVS 二极管制造商的数据表中获得。

对于 $t_p \leq 20\mu\text{s}$:

$$R_d(t_p) = R_D(8/20\mu\text{s}) \tag{3}$$

对于 $20\mu\text{s} < t_p < 1\text{ms}$:

$$R_d(t_p) = \frac{R_D(10/1,000\mu\text{s}) - R_D(8/20\mu\text{s})}{980} [t_p - 20\mu\text{s}] + R_d(8/20\mu\text{s}) \tag{4}$$

对于 $t_p \geq 1\text{ms}$:

$$R_d(t_p) = R_D(10/1,000\mu\text{s}) \tag{5}$$

这种多参数相关性会导致具有挑战性的迭代设计过程。为了简化设计，TI 发布了一个用于 TVS 选择的在线工具 [5]。图 5 以流程图的形式展示了设计方法，而表 1 列出了机架式服务器的典型规范。

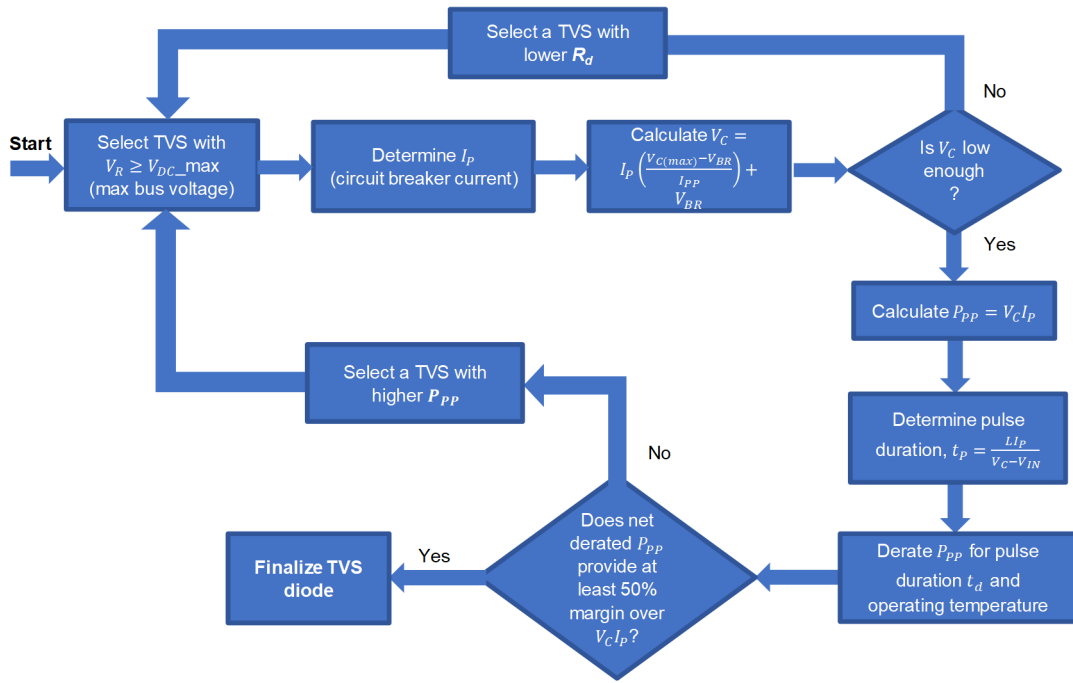


图5. TVS 二极管选择流程图。

参数	值
额定工作电压 (V _{IN})	12V
最大工作电压 (V _{DC_max})	13.2V
断路器电流 (I _p)	200A
寄生电感 (L)	100nH
最大容许电压 (V _{C(max)})	20V
最大工作温度	75°C

表1. 典型系统规范。

设计步骤

为机架式服务器设计输入保护时，请从数据表中选择 TPS25984B 电子保险丝的支持元件值，然后按照以下设计步骤选择 TVS。首先，选择反向关断电压等于或大于 V_{DC_max} 的单向 TVS。我们选择了 Littlefuse SMDJ12A 二极管 [4] 作为起点。接下来，确定 I_p，即断路器电流。然后计算钳位电压。因为 R_d 是 t_p 的函数，所以使用 方程式 6 查找 t_p：

$$t_p = \frac{L I_p}{V_{C(max)} - V_{IN}} = \frac{100\text{nH} \times 200\text{A}}{20\text{V} - 12\text{V}} = 2.5\mu\text{s} \tag{6}$$

对于低于 20μs 的脉冲宽度，您可以在 8/20μs 测试脉冲将动态电阻近似为该值。从 SMDJ12A 数据表中，我们的计算结果为：

$$V_{BR(max)} = 14.7\text{V} \tag{7}$$

$$V_{C(max)atI_{pp}(8/20\mu\text{s})} = 25.71\text{V}$$

$$I_{pp}(8/20\mu\text{s}) = 754\text{A}$$

因此:

$$R_d(8/20\mu s) = \frac{V_C(\max) - V_{BR}(\max)}{I_{PP}} = \frac{25.71 - 14.7}{754} = 14.6m\Omega \quad (8)$$

现在, 使用 14.6mΩ 的 R_d , 计算钳位电压:

$$V_C = V_{BR}(\max) + I_P R_d = 14.7V + 200A \times 14.6m\Omega = 17.6V \quad (9)$$

由于钳位电压小于最大可耐受电压 $V_C(\max)$ (TPS25984B 电子保险丝的 20V 绝对最大额定值), 因此您可以进一步使用 SMDJ12A; 否则, 您必须考虑具有较低 R_d 的 TVS 二极管或并联 TVS 二极管。

使用以下项目计算峰值功率:

$$P_{PP} = V_C I_P = 17.6V \times 200A = 3.52kW \quad (10)$$

由于 SMDJ12A 支持 2.5μs 内 60kW 的峰值功率 (请参阅 图 6), 因此您可以进一步操作。

现在, 使用 图 6 降低额定功率和温度。75° 支持的最大功率为:

$$P_{PP} \times \text{derating_factor} = 0.8 \times 60kW = 48kW \quad (11)$$

由于 48kW > 3.52kW 且 $V_C < 20V$, 因此 SMDJ12A 是此应用的理想选择。

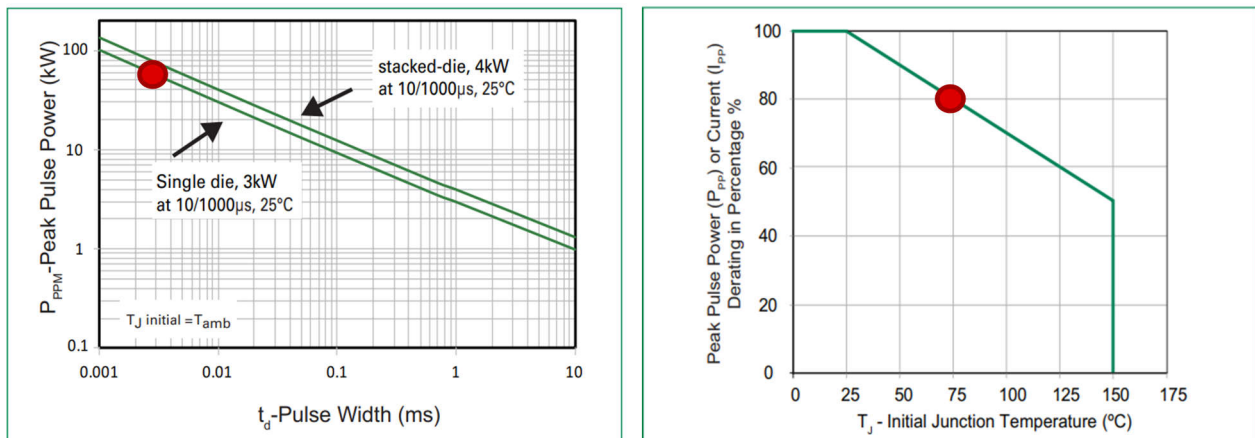


图 6. 峰值脉冲功率额定值 (左) 和峰值脉冲功率降额曲线 (右)。

图 7 展示了 TPS25984B 系统上 SMDJ12A 的钳位性能。

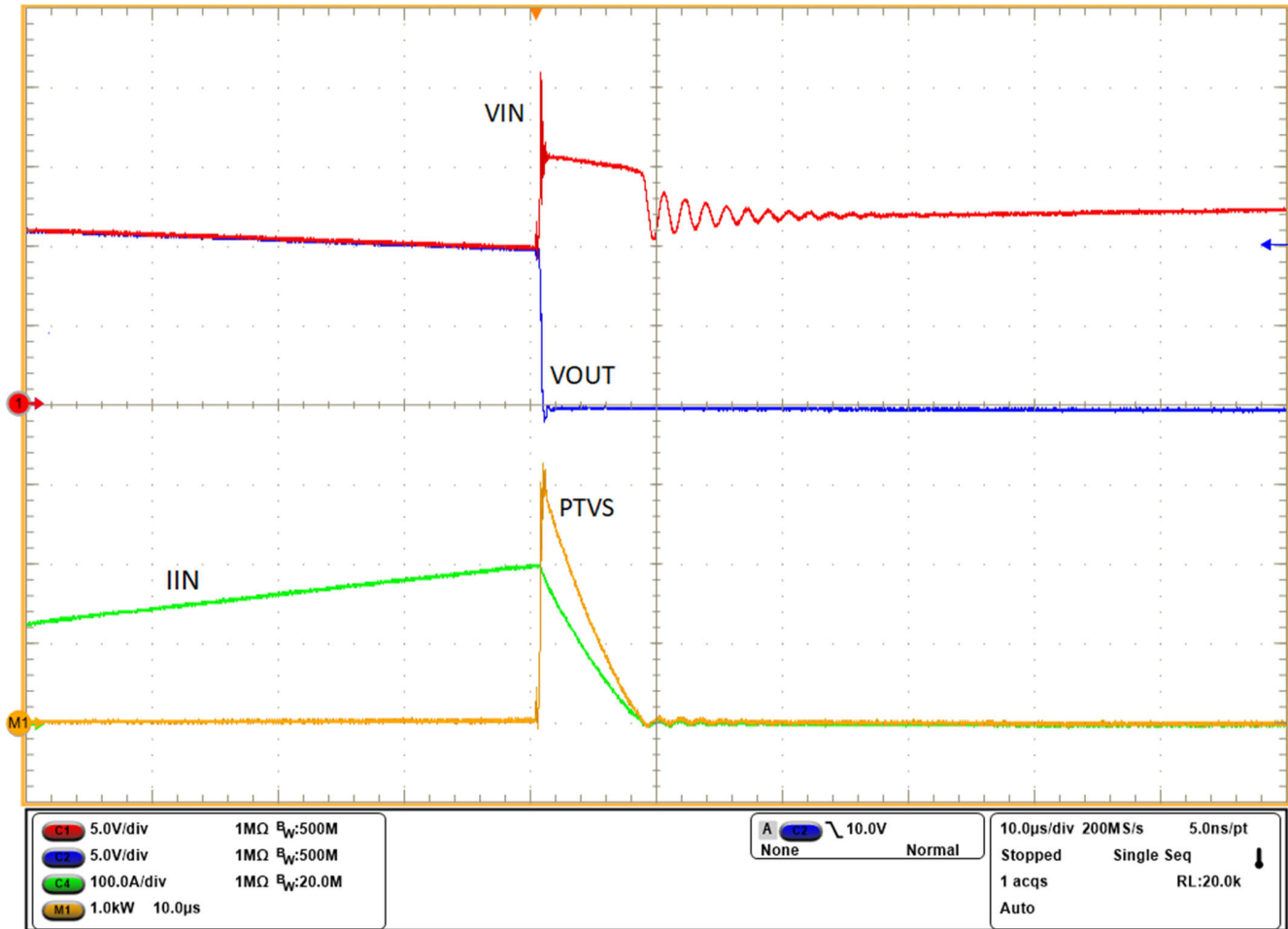


图 7. 在 TPS25984B 电子保险丝的输入端使用 SMDJ12A 二极管来实现瞬态保护。

输出肖特基二极管选择

图 8 展示了当使 OUT 引脚低于接地值时，IC 内部可能发生的一系列事件。寄生 PN 结二极管开始导通，这会将自由电子注入基板。这些自由电子会干扰其他控制单元，从而可能使 IC 复位或导致闩锁效应事件。通过寄生 PN 结二极管的大电流传导可能会引起 EOS 并导致 EIPD。

通过降低 OUT 引脚上的峰值负电压或限制通过 OUT 引脚的电流，可以防止这些问题。在 OUT 引脚附近添加一个输出电容器，可将会吸收负电压峰值中的部分能量，并控制压摆率以限制峰值负电压。在 OUT 引脚上添加一个低正向电压肖特基二极管可提供替代电流路径并限制流经 IC 的电流。

有效钳位需要电容器和肖特基二极管的组合。虽然较高输出电容器很有用，但选择肖特基二极管时请遵循以下指导原则：

- 直流阻断电压必须大于最大输入工作电压。
- 所选二极管的非重复峰值正向浪涌电流必须大于 I_P 。
- I_P 处的正向压降必须处于 OUT 引脚的绝对最大额定值范围内（对于 TPS25984B 为 $-1V$ ）。

在此应用中，我们并联使用了两个 Diodes Incorporated 生产的 SBR10U45SP5 [6] 二极管。

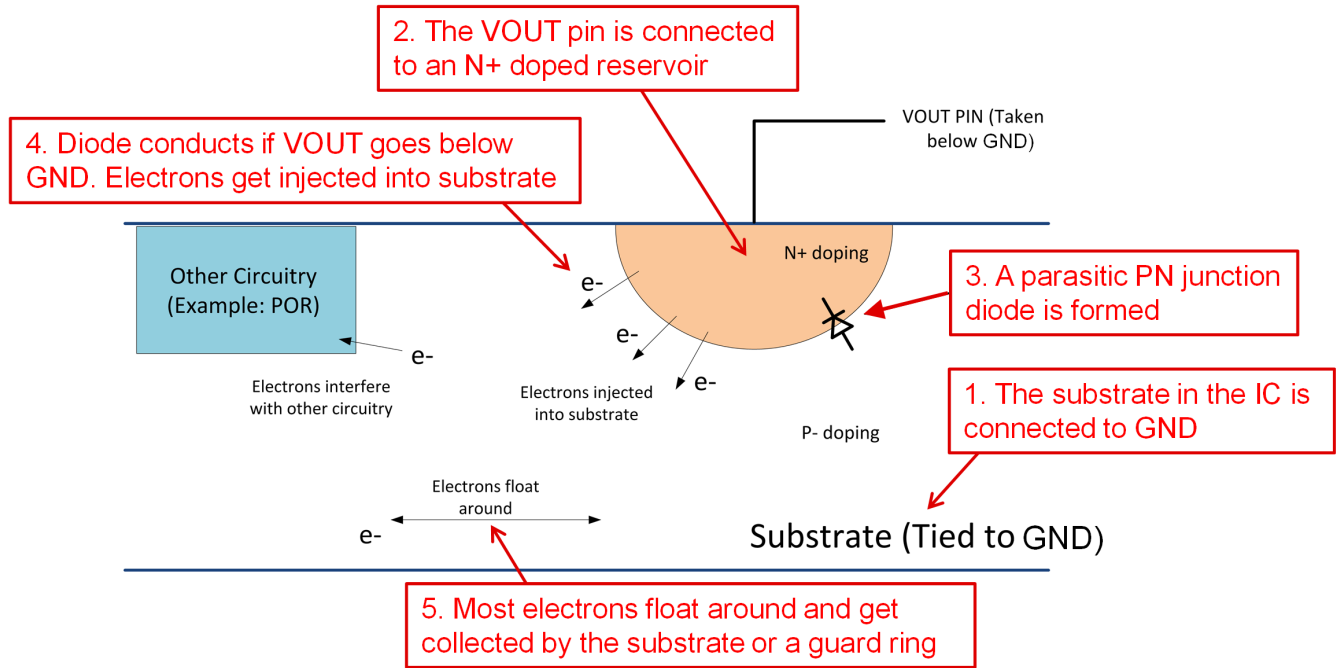


图 8. 示意图展示了将输出降至接地值以下时 IC 内部的后果。

图 9 所示为 TPS25984B 解决方案中采用和不采用肖特基二极管时的输出钳位性能。

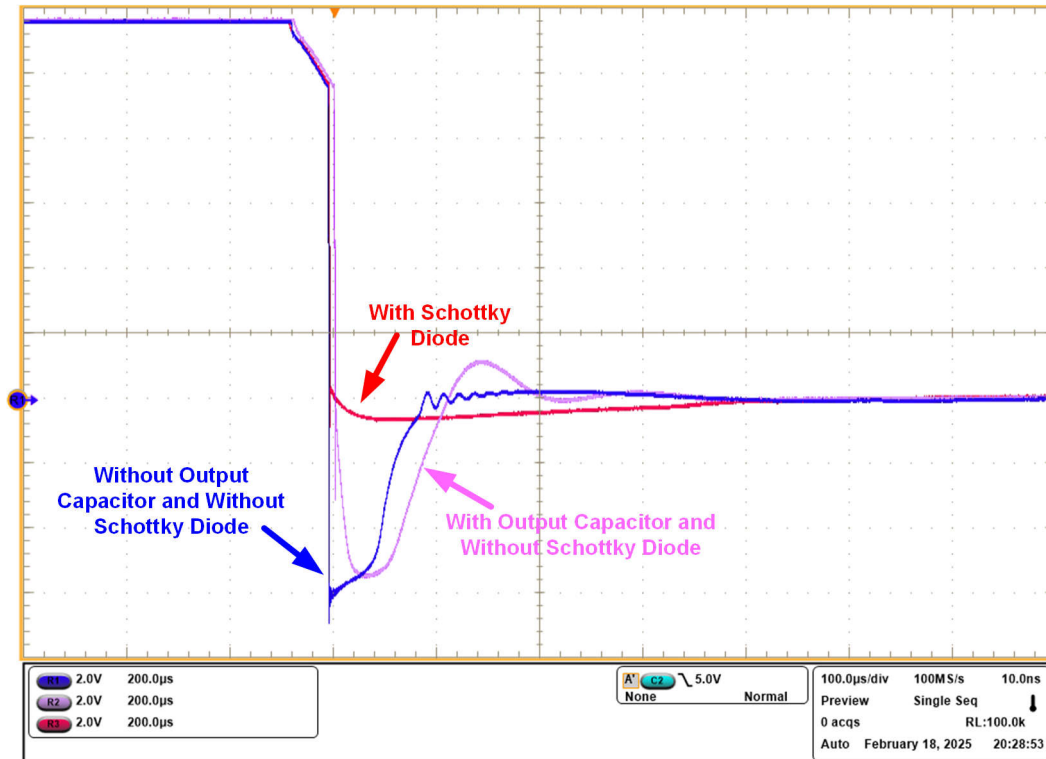


图 9. 电子保险丝输出端的瞬态保护。

处理高电流热插拔解决方案时，次级保护（如 图 10 所示）可以最大限度地降低输出端对肖特基二极管的要求。如您所见，D1 将吸收负电压瞬变中的大部分能量。添加 47Ω 等低阻值电阻器 (R1) 和 SS13 等二极管 (D2) 将显著限制剩余能量。

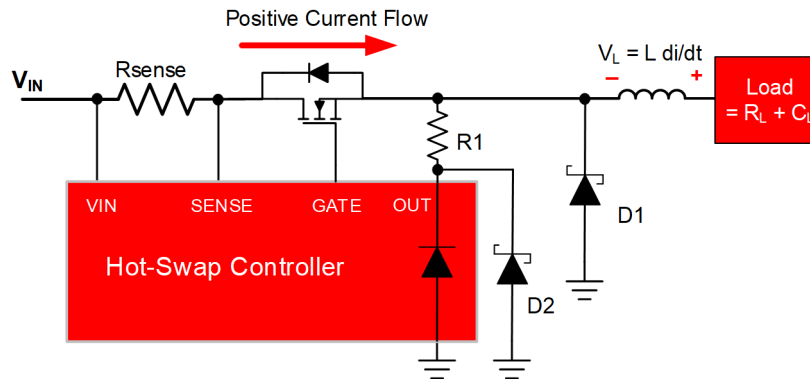


图 10. 高电流热插拔解决方案中的次级保护。

放置和 PCB 布局注意事项

必须将保护器件（例如 TVS 二极管、去耦电容器和肖特基二极管）放置在目标保护器件附近。分布式电感限制了分流元件（例如去耦电容器和 TVS 二极管）的效率带宽。它会限制浪涌电流，并在钳位期间导致更大的瞬态电压峰值，如 **图 11** 中所示。因此，布局应使这些分流元件具有最小的串联阻抗。进行布线时，使用短布线和多个过孔以降低电感。

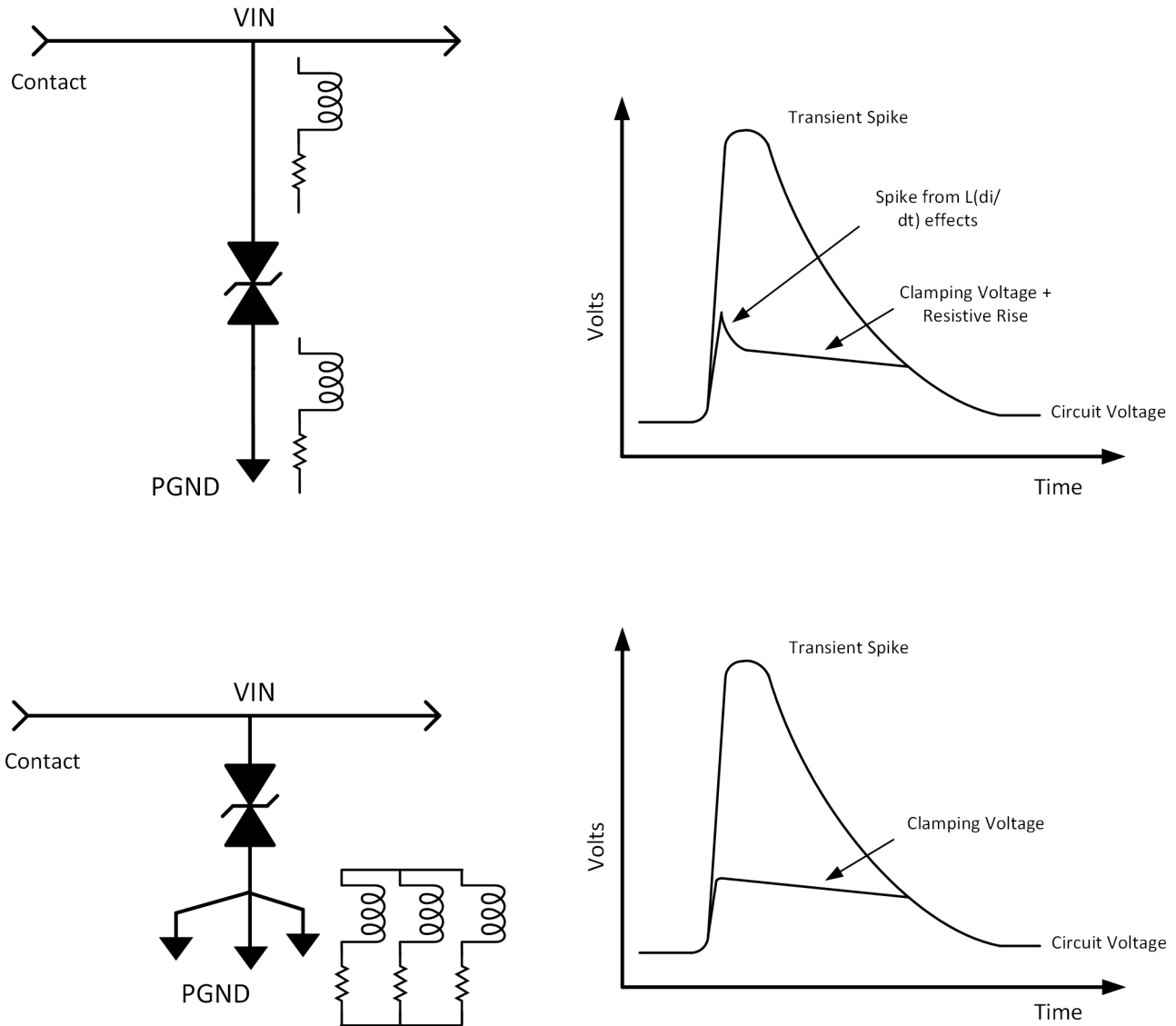


图 11. 相对于 PCB 布局的 TVS 钳位性能影响。

结语

分立式前端保护电路被电子保险丝等有源电路保护器件所取代，以提高性能。但是，电子保险丝通常需要瞬态保护来防止违反其绝对最大规格。本文讨论的元件选择指南和布局注意事项可帮助您设计解决方案，以确保可靠电源路径保护。

参考资料

1. Panguloori, Rakesh.2016. “[电子保险丝的基本知识](#)。”德州仪器应用报告，文献编号 SLVA862A，2016 年 12 月。
2. Artem Rogachev, 2014. “[可靠的热插拔设计](#)”，德州仪器 (TI) 应用报告，文献编号 SLVA673A，2014 年 4 月。
3. ESD 行业委员会。 “[白皮书 4：了解电过应力 – EOS](#)。” 2016 年 8 月。
4. “[SMDJ12A TVS 3KW 12V 5%UNI DO-214AB TR13 RoHS](#)。” Littlefuse 数据表。2025.
5. 德州仪器 (TI) (日期不详) [TVS 二极管推荐工具](#)。2023 年 6 月 26 日。
6. “[SBR10U45SP5 10A SBR 超级势垒整流器](#)。” Diodes Inc. 数据表，文献编号 DS31371，2024 年 1 月。

相关网站

- [TPS25984B](#)
- [LM5066I](#)

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

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