

Technical Article

安全实现 DC/DC 转换器的热插拔



在电源转换器中，输入电容器通过电感电缆连接到电源。寄生电感会导致在首次插入系统（也称为热插拔）时，输入电压振铃几乎达到其直流电压值的两倍。如果电源转换器输入阻尼不足以及缺乏浪涌控制，则可能会损坏转换器。

使用输入大容量电解电容器来抑制非电池转换器的输入电压，可以防止在首次施加电池电源时出现过高的电压振铃，同时还可以防止可能导致转换器不稳定的谐振。随着传统的 12V 汽车电池转向 24V_{IN} 和 48V_{IN} 系统，适当抑制输入的需求变得更加重要。12V 电池系统通常采用额定电压为 40V 或更高的元件，以在负载突降的情况下承受短时电压尖峰。这些 12V 系统的最大直流电压可以达到 18V_{DC}。热插拔会导致输入振铃，其电压将接近输入电压的两倍，即 36V。这远低于元件的 40V 或更高额定值。但是，在稳态输入电压可达到 54V 的 48V 系统中，输入振铃可能会超过 100V，从而损坏额定电压为 80V 的元件。

对于传统的 12V 系统，人们通常认为阻尼电容器具有足够的有效串联电阻 (ESR) 来抑制谐振。但是，使用低成本铝电解电容器时，实际有效 ESR 通常远低于所公布的最大值，因此在施加电池电源时阻尼作用大幅降低、振铃现象更加显著。在 12V 系统中，降低的阻尼作用可能仍然足以防止下游 DC/DC 转换器不稳定，并且振铃不会造成损坏。但是，在更容易受到振铃影响的 48V 系统中，可以增加与输入阻尼电容器串联的分立式电阻器。根据稳态纹波电流，0603（公制 1608）尺寸应已足够。

在图 1 中，现有 DC/DC 转换器输入滤波器的 L1 和 C1 值会产生谐振，可由公式 1 表示：

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = 8\text{kHz} \quad (1)$$

我们根据 TI E2E™ 设计支持论坛技术文章“抑制输入磁珠谐振以防止振荡”，选择了目标阻尼电容器 (C_d) 和阻尼电阻 (R_d)。理想情况下，C_d 应至少是 C₁ 的三倍。我们为 C_d 选择了 150μF 标准值。

公式 2 表示目标阻尼电阻：

$$Z_o = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = 0.5\Omega \quad (2)$$

对于阻尼电阻器 (R_d)，增加两个并联的 1 Ω 电阻器并与 C_d 串联。

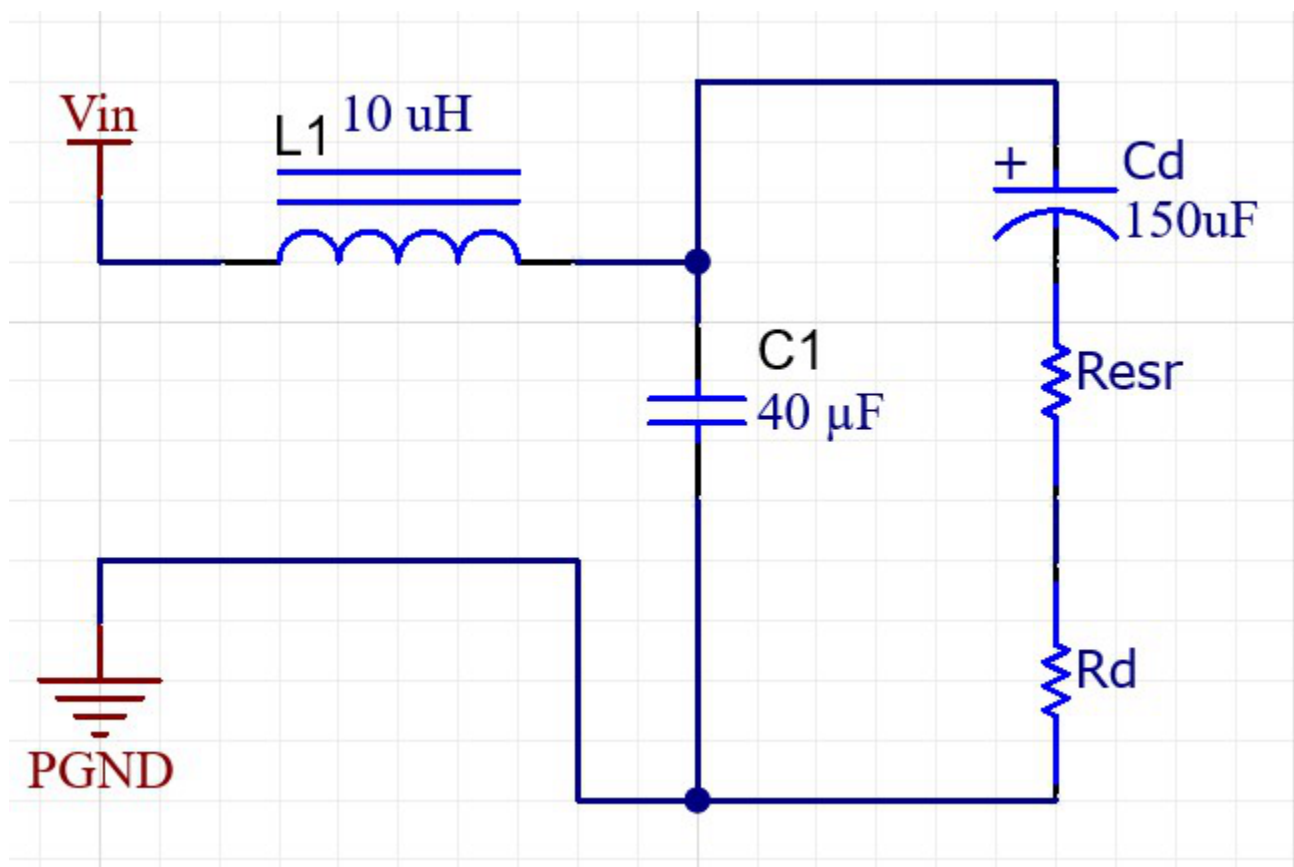


图 1. 具有阻尼作用的简化输入滤波器可防止在首次施加电池电源时出现过高的电压振铃，同时还可防止可能导致转换器不稳定的谐振。

图 2 显示了无论是否增加与 C_d 串联的 $0.5\ \Omega$ 阻尼电阻器时的仿真热插拔响应。

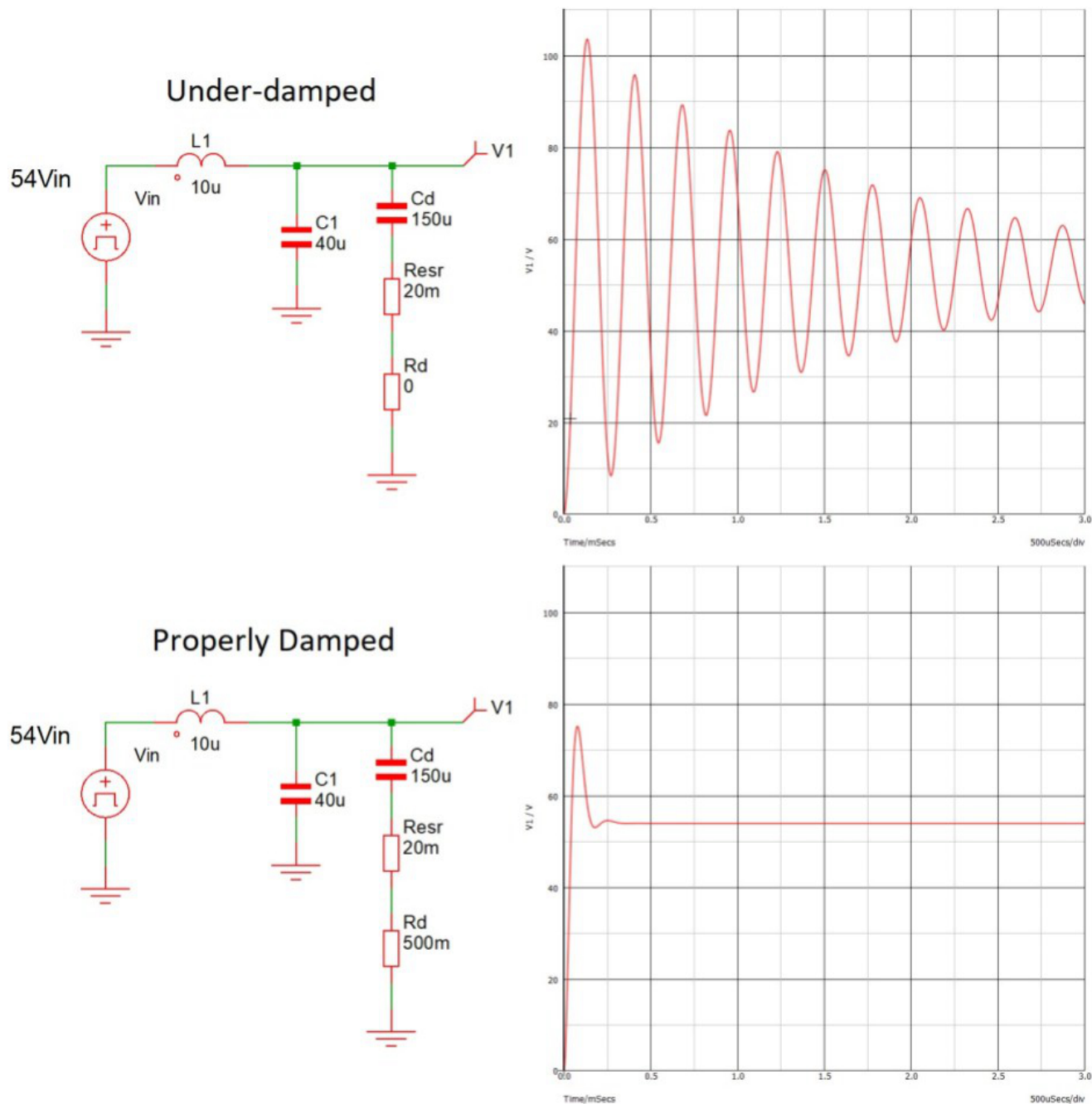


图 2. 无论是否使用与 C_d 串联的 0.5Ω 阻尼电阻器时的热插拔仿真。

我们通过使用正确的阻尼电阻器和电容器组合来实现输入滤波器的阻尼。但有一个方面很容易受到忽视。在实验室中，我们遇到了热插拔到电源时阻尼电阻器 (R_d) 受到损坏的情况。我们意识到，阻尼电阻器具有由公式 3 表示的峰值功率：

$$P_{pk} = \frac{V_{IN_Max}^2}{R} \quad (3)$$

对于 54V 电压上的 1Ω 电阻器，每个电阻器的峰值功率约为 2,900W。此外，电阻器在很短的时间内耗散的能量约等于存储在阻尼电容器 (C_d) 中的能量。存储在阻尼电容器中的能量由公式 4 表示

$$E_{C_d} = \frac{(C_d)(V_{in}^2)}{2} \quad (4)$$

在本例中，能量在两个 1Ω 电阻器之间平分。采用 $150\mu\text{F}$ 电容、 54V_{IN} 电压时，能量总计约为 220mJ ，即每个 1Ω 电阻器 110mJ 。这是一个略显严苛的假设，因为 C_d 的内部 ESR 会将这些电阻器两端的实际峰值电压降低约 4%。

将实际浪涌与浪涌额定值图中的曲线进行映射并不简单。实际浪涌曲线将大致呈指数衰减波形，而电阻器额定值则基于固定持续时间内功率恒定的假设，如图 3 所示。

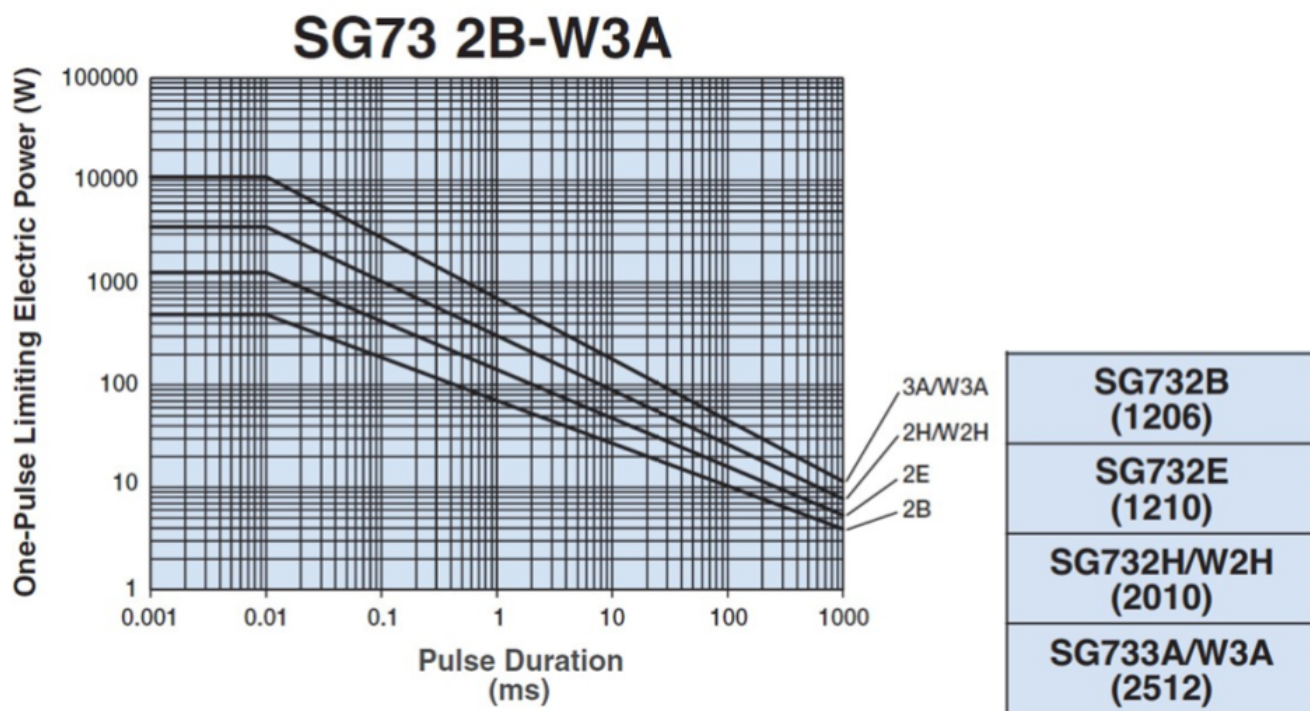


图 3. 浪涌额定电阻器额定值示例，显示大致呈指数衰减波形。

保守方法是将电阻器中耗散的总能量除以峰值功率。然后可以对照电阻器的浪涌额定值图检查由此产生的脉冲持续时间。计算出的脉冲将比实际脉冲更剧烈，因为实际情况中，相同的加热能量会分散到更长的时间范围内。在本例中，将每个电阻器的 110mJ 能量除以 $2,900\text{W}$ ，即得出 $38\mu\text{s}$ 。尺寸为 2512 SG733A/W3A 的浪涌额定电阻器可以处理 4.5kW 的功率并持续大约 $40\mu\text{s}$ ，这意味着该封装电阻器适合此应用。采用相同 2512 封装的通用电阻器的额定功率比浪涌额定电阻器低至少一个数量级。

此计算确实忽略了串联电感的影响。电感器将减缓流入电阻器的电流上升并降低最大功率，但也会增加过冲产生的总损耗，如图 2 所示。包括 $10\mu\text{H}$ 电感器在内的仿真结果显示，电阻器中的峰值功率相较于计算得出的功率 2.9kW 降低了 30%，但电阻器中的总能量比前面计算得出的 110mJ 高 17%。额定值曲线表明，允许能量与峰值功率的负三分之二次幂成比例。因此，峰值功率降低 30% 时，损耗增加 27%，同时对于无论是否具有串联输入电感的情况，我们仍采取保守计算。

避免热插拔故障

虽然最佳的汽车安装和维护做法可以避免热插拔，但我们需要认识到错误仍会发生。遵循本文中所述的步骤可避免对系统造成代价高昂的损坏。作为您的电力管理合作伙伴，TI 将矢志不渝地致力于突破电源极限。

相关内容

- [电源技巧 125](#)：光耦仿真器如何提升隔离式 DC/DC 转换器的可靠性与瞬态响应
- [电源技巧 124](#)：如何提高 PFC 的功率因数
- [电源技巧 123](#)：使用双升压转换器扩展高转换比设计的功率范围
- [电源技巧 122](#)：1kW 高密度 LLC 电源模块中使用的平面变压器概述

其他资源

- 下载 [Power Stage Designer™](#) 软件工具

先前已发布于 EDN.com 上。

商标

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、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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月