

Technical Article

使用交错接地平面改善隔离式电源噪声滤除



Josh Mandelcorn

过去，汽车电子设备通过与用来启动车辆的同一 12V 铅酸电池供电。即使在发电机运行且电池电缆断开的情况下可能发生高达 42V 的浪涌，电压仍会保持在低于 60V_{DC} 的安全超低电压 (SELV) 范围内。因此，无需担心导电印刷电路板 (PCB) 布线的间距问题，来避免汽车电路中发生电击危险。

由于电动汽车 (EV) 的电机需要更高的电压 (400V 或 800V) 才能运行，因此电击危险现在是汽车应用中需要关注的一个问题。连接到交流电源的电路与使用公用电力的 SELV 电路之间的边界所适用的严格间隔，现在也适用于连接到电动汽车中高压电池的电路与使用 12V 系统运行的 SELV 电路之间的边界，如信息娱乐系统和车身电子设备 (主要是照明)。

无法满足 CISPR 25

为了驱动使用高压电动汽车电池运行的牵引逆变器中的大功率半导体开关，需要用到辅助电源，其中许多都是由低压 12V 系统供电。问题是，这些隔离式电源会将大量共模噪声泵回 12V 汽车电池线路，导致其无法满足汽车国际无线电干扰特别委员会 (CISPR) 25 传导发射限制，该限制扩展至 108MHz。此噪声很大程度上由辅助电源隔离变压器的初级绕组和次级绕组之间的开关波形电容耦合来驱动。初级接地和次级接地之间具有高额定浪涌电压的旁路电容器 (Y 电容器) 会形成一个小环路，很大程度上可以抑制这种共模噪声，而电池线路上的共模滤波可以进一步降低这种噪声，从而可以符合 CISPR 25 限制要求。

汽车电路的间距要求

关于高压电动汽车电池和大多数传统汽车电路中使用的低压 12V 电池系统之间的增强间距，常见的目标是 8mm 间距。这将涵盖 400V_{RMS}、污染等级 2 和材料组 III；或 800V_{RMS}，同样是污染等级 2，但材料组 I。有关间距要求的更多详细信息，请参阅国际电工委员会 (IEC) 60664-1 标准“低压供电系统内设备的绝缘配合第 1 部分：原理、要求和试验”。

满足多层 PCB 的爬电距离和间隙要求

IEC 的严格间距要求是由暴露在污染空气中的表面的高压击穿 (爬电) 以及空气本身的击穿或电弧 (间隙) 来推动。在桥接初级-次级隔离栅的元件中 (如变压器或集成电路 (IC))，以及不接触空气或水分的多层 PCB 的内层中，间距要求低得多，只要隔离层能够承受数千伏高电压测试即可。对于增强型隔离栅应用中使用的 IC，常见的测试电平为 5kV，这使得具有四层或以上的 PCB 能够在内层上实现初级接地和次级接地相互交错。内层有间距要求，但与暴露在空气中的层相比，要求显著降低。在某些应用中，1mm 间距对于 800V 电池系统来说就已足够。

采用隔离式直流/直流转换器的演示

我们构建了两块电路板，用于对比 CISPR 25 5 类限制来演示我们 UCC12051-Q1 隔离式直流/直流转换器的发射性能。该转换器包含一个典型的电池线路电磁干扰滤波器，专为在 100mA 负载下 5V 输入和 5V 输出而设计。一个板 (未发布) 的所有四个层面上初级和次级之间的间距都为 8mm，还有一个板 (汽车级、CISPR 25 5 类发射、隔离式 5V 辅助电源参考设计) 允许在两个内层中实现初级接地和次级接地交错，且初级接地和次级接地之间的间距为 1mm。初级接地到次级接地的附加有效电容估计为 11pF。UCC12051-Q1 内部的隔离式转换器以 8MHz 进行切换，确保它在 CISPR 25 方面的第一个频率是其在 32MHz 下的四次谐波。

图 1 是隔离式 5V 参考设计原理图中的一个片段，其中显示了一个 IC 隔离式转换器，它具有初级接地连接到次级接地电容器，用于抑制由转换器的隔离变压器产生的高频噪声。未发布的电路板与隔离式 5V 参考设计相同，只是缺少 PCB 层交错。

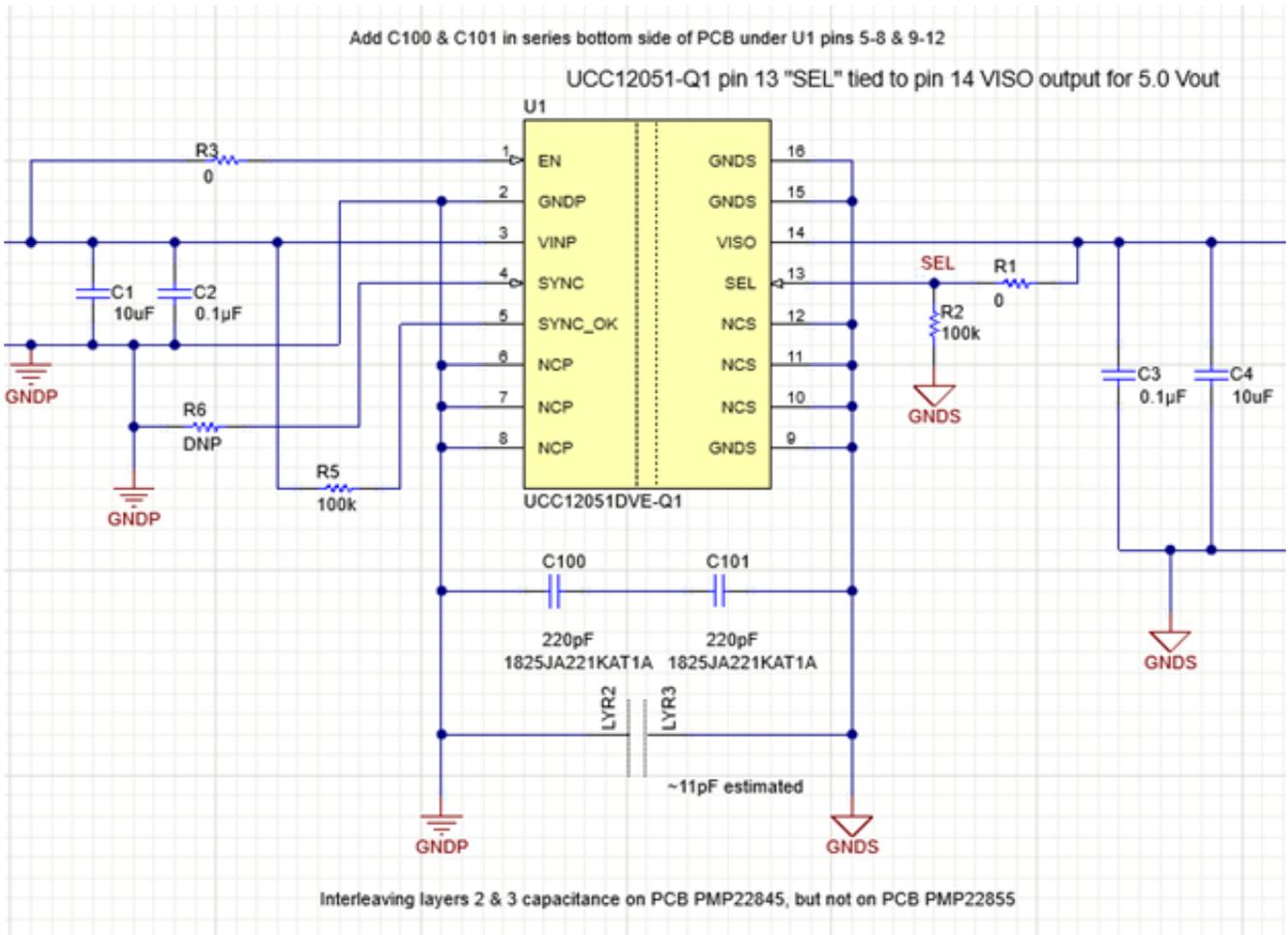


图 1. 隔离式 5V 参考设计中直流/直流转换器的初级和次级接口，其中显示增加了旁路电容器 C100 和 C101 以及交错内层电容。来源：德州仪器 (TI)

鉴于需要冗余以确保安全，并且需要保持初级接地到次级接地的整体间距，我们放置了两个串联 Y 电容器 (C100 和 C101)，用来桥接初级接地和次级接地。因此，有效电容是每个电容器值的一半。在某些情况下，需要三个串联电容器 (330pF 电容器) 来保持必要的间距。

在图 2 中，左侧图像是未发布的电路板，所有层的间距均为 8mm；右侧图像是隔离式 5V 参考设计，顶层和底层的间距为 8mm，内层间距仅为 1mm，使得它们的初级平面和次级接地平面能够重叠。

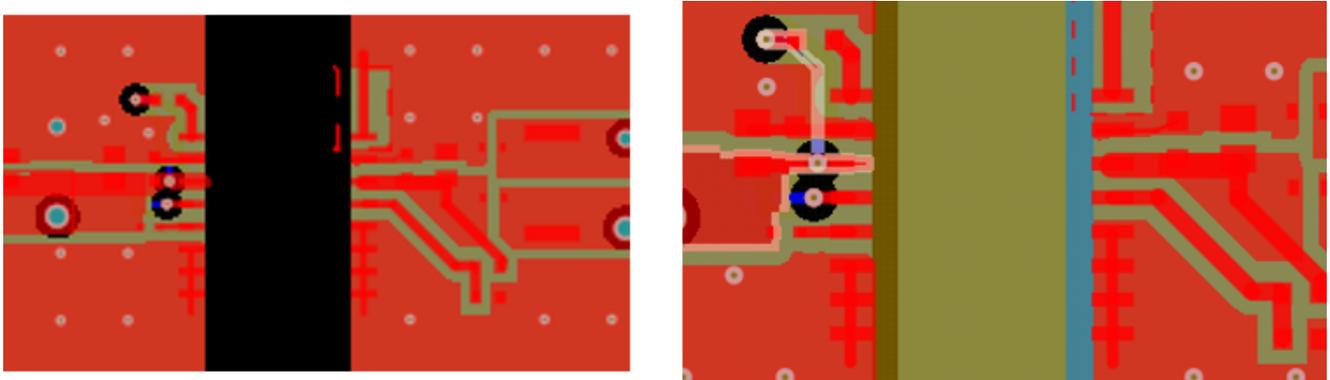


图 2. 所有层上全部间距 8mm (左) 与仅顶层和底层间距 8mm (右)：顶层为红色；第 2 层为深绿色；第 3 层为浅蓝色；第 4 层为棕褐色；第 2 层和第 3 层的重叠为浅绿色；任何层上无铜为黑色。来源：德州仪器 (TI)

辐射发射与 CISPR 25

对于隔离式 5V 参考设计，我们预计这种交错加上初级接地和次级接地之间增加的 11pF 电容，只会对 200MHz 以上的辐射发射有所帮助。实际上，在所有高于 200MHz 的频率下，交错层使辐射发射能够符合 CISPR 25 5 类标准，即使没有旁路电容器 C100 和 C101 也是如此（图 3）。在没有交错层的情况下，我们在初级接地和次级接地之间需要额外的 Y 电容器，才能在相同的频率范围内符合要求。有关发射测试设置，请参阅[测试报告](#)。

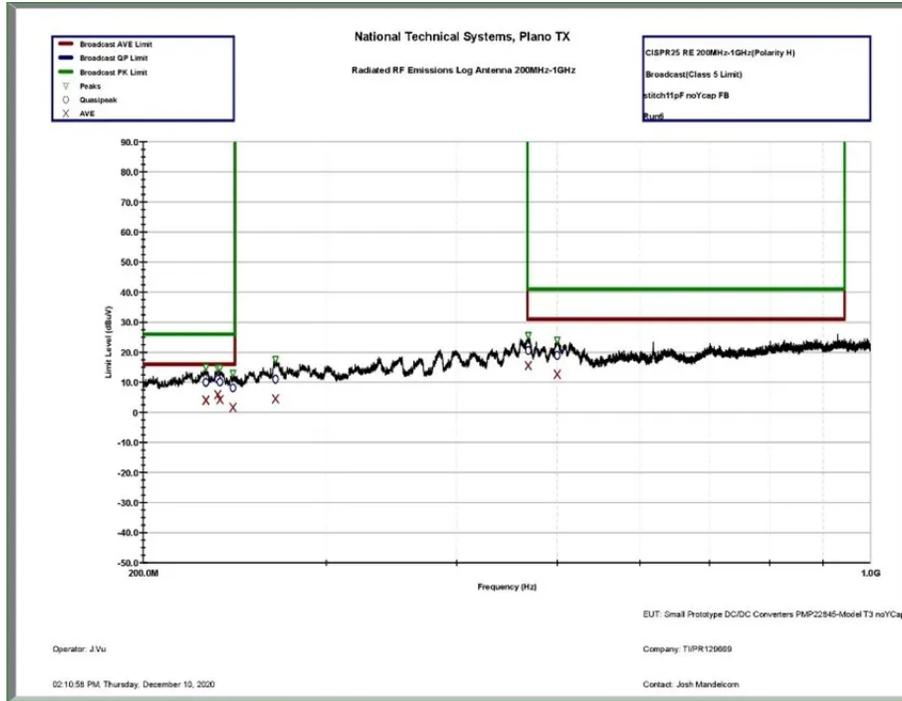


图 3. 无额外 Y 电容器的情况下，200MHz 以上辐射发射与 CISPR 25 5 类要求。此特定扫描未包含在隔离式 5V 参考设计测试报告中。电路板以大于 10dB 的裕度达到了限制要求。来源：德州仪器 (TI)

出乎意料的是，在严格的传导发射限制下，30MHz 至 108MHz 范围的滤波 (C101 和 C102) 得到显著增强。借助初级接地和次级接地之间 110pF 的有效附加电容，交错改善了整个 30MHz 至 108MHz 范围内的传导降噪，幅度大约为 4dB 至 8dB。在该频率范围内，交错使得结果从以 4dB 之差达不到要求，变为以 4dB 的裕度达到要求。

传导发射与 CISPR 25

图 4 和图 5 显示了这两个电路板的传导发射扫描，唯一的区别是内层交错。两次扫描都在相同的线路阻抗稳定网络 (LISN) 上进行，采用相同的共模电池线路滤波，以及相同的 5V 输出 100mA 负载。

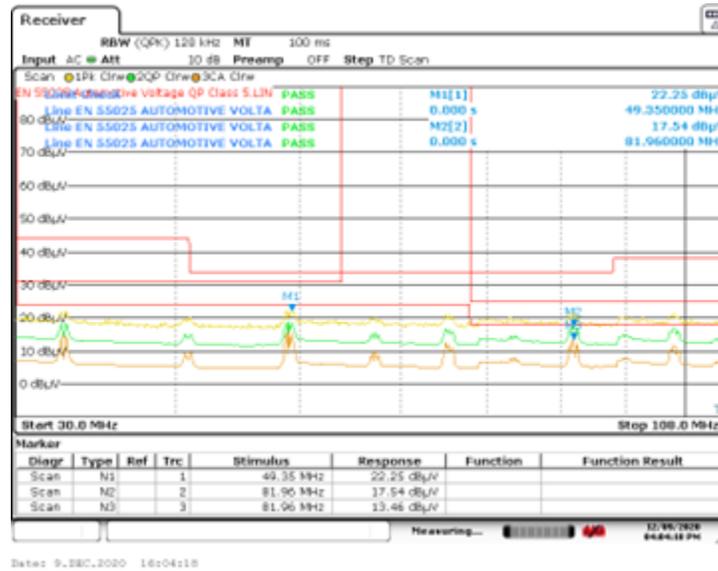


图 4. 隔离式 5V 参考设计 (有交错层) 传导发射与 CISPR 25 5 类 (30MHz 至 108MHz) : 以 4.5dB 的裕度达到要求, 最坏情况是在 82MHz 下进行的“CISPR 平均值”检测。来源: 德州仪器 (TI)



图 5. 未发布电路板 (无交错层) 传导发射与 CISPR 25 5 类 (30MHz 至 108MHz) : 以 3.8dB 的裕度未达到要求, 最坏情况是在 32MHz 下进行的 CISPR 平均值检测。来源: 德州仪器 (TI)

估计电容为 11pF 的交错层对滤波的贡献远大于在 Y 电容器的有效 110pF 电容上增加 11pF, 后者将使滤波改善约 1dB。内层接地层可降低桥接 Y 电容器的有效电感, 使它们能够更好地分流这些高频谐波。

这一滤波改进加上近端接地平面的优点, 可以提高电容器滤波的性能, 无论目标是限制输出噪声、控制非隔离式应用中的发射, 还是减少半导体上的应力和故障。

相关内容

- 电源设计小贴士 117 : 在完全工作条件下进行测试之前测量 LLC 谐振回路
- 电源设计小贴士 116 : 如何降低 PFC 的 THD
- 电源设计小贴士 115 : GaN 开关集成如何在 PFC 中实现低 THD 和高效率
- 在电动汽车设计中阻止 EMI 扩散
- 新的 EMI 威胁 ?

其他资源

- 使用 [PCB 爬电计算器](#) 实现增强型隔离双重结果。
- 通过德州仪器 (TI) 了解更多信息：
 - “[如何满足汽车应用中更高的隔离爬电和间隙需求](#)”。
 - “[电源设计小贴士：接地平面 - 开关稳压器噪声管理中的关键元件](#)”。
 - “[符合汽车发射要求的功率转换技术](#)”。
 - “[通过将电感寄生效应降至最低来降低降压转换器 EMI 和电压应力](#)”。

相关标准

- [IEC 60664-1](#) 低压供电系统内设备的绝缘配合第 1 部分：原理、要求和试验
- [IEC 61800-5-1](#) 调速电气传动系统第 5-1 部分：安全要求 - 电气、热和能量
- [电子电路互连与封装协会 \(IPC\) 2221B](#) 印制板设计通用标准
- [CISPR 25 版本 5.0 b 2021](#) 车辆、船舶和内燃机 - 无线电干扰特性 - 用于板载接收器保护的限值和测量方法

之前在 [EDN.com](#) 上发布。

重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司