

隔离式直流/直流转换器 EMI 基础知识及要求



Robert Martinez
高压电源、高压控制器
高级系统设计工程师

Zhemin (Jimmy) Zhang
高压电源、高压控制器
系统工程师

The TI POWER logo, consisting of the text 'TI POWER' above a horizontal line of five red dots.

TI POWER

了解管理和减少 EMI 发射对于提高设计性能的重要性。

内容概览

本文讨论了电磁干扰 (EMI) 发射的基础知识, 重点介绍了在隔离式直流/直流转换器中降低 EMI 的相关要求和行业标准。

- 1 各种发射类型**
辐射发射和传导发射的限制都取决于频率范围和目标设备。
- 2 EMI 的常见原因**
文章介绍了对 EMI 问题(包括由隔离变压器引起的 EMI)进行分类的几种方法。
- 3 如何降低 EMI**
管理 EMI 的最常见方法之一是使用更好的开关控制方案从源头降低 EMI。

值和平均测量值, 并绘制在图上。

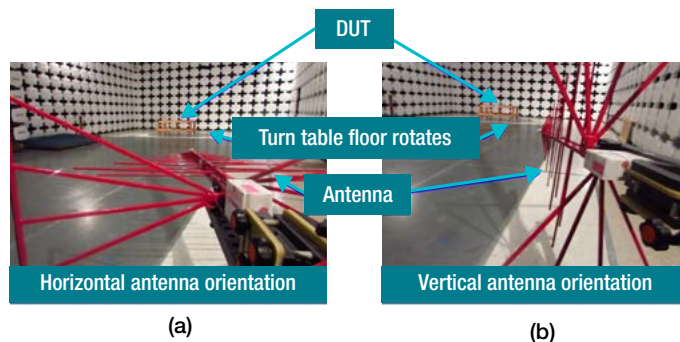


图 1. 一个 10m 的辐射发射屏蔽室, EUT 置于旋转桌上: 水平天线方向 (a); 垂直天线方向 (b)。

准峰值与均方根值相似, 即都是低于峰值, 但高于平均值。准峰值较高的原因是, 峰值事件在同一时间范围内发生的频率更高。

图 2 显示了峰值、准峰值和平均值之间的差异。

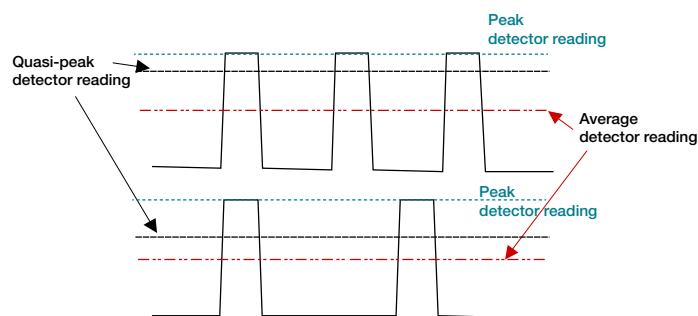


图 2. 天线检测到的两个信号的峰值、准峰值和平均值。两个波形的峰值和平均值相同, 但底部波形的准峰值较低。

EUT 的最高内部频率决定了辐射发射的最高测量频率, 如表 1 所示。

| 最高内部频率 (F_x) ¹ | 最高测量频率 |
|--|------------------------|
| $F_x \leq 108\text{MHz}$ | 1 GHz |
| $108\text{MHz} < F_x \leq 1\text{GHz}$ | 2 GHz |
| $500\text{MHz} < F_x \leq 1\text{GHz}$ | 5 GHz |
| $F_x > 1\text{GHz}$ | F_x 的 5 倍, 最高可达 6GHz |

¹ 对于 FM 和 TV 广播接收器, F_x 由生成或使用的最高频率 (不包括本机振荡器频率和调谐频率) 确定。

表 1. CISPR 32 标准中的辐射测量所需的最高频率。

如果不对 EMI 加以管理并妥善降低到附近电路的敏感度以下, EMI 可能会对邻近电路造成干扰。为了使电路之间可以“和谐共处”, 国际无线电干扰特别委员会 (CISPR)、国际电工委员会、欧洲电工标准化委员会、美国联邦通信委员会和美国军事标准等机构均制定了规范和降低 EMI 的行业标准。

CISPR 32 标准规定了工业设备的最大传导发射和最大辐射发射。CISPR 32 取代并整合了常见的 CISPR 22 和 CISPR 13 规范。

CISPR 32 根据最终用户环境的类型定义了两类设备。B 类要求旨在为住宅环境中的广播服务设备提供足够的保护。主要用于住宅环境的设备必须符合 B 类限制; 所有广播接收器设备均视为 B 类设备。A 类要求适用于所有非 B 类设备; A 类设备符合更宽松的等级限制 [1, 2]。

辐射发射

3m 和 10m 的屏蔽室均可对辐射发射进行测试。考虑到发射强度范围差异较大, 且 3m 的屏蔽室具有更高的限值, 本次测试选择在 10m 长的法拉第屏蔽室中进行。

在屏蔽室内, 天线在每个测试频率下以 1m 和 4m 高度检测和测量水平与垂直位置的发射, 如图 1 所示。受试设备 (EUT) 放在可旋转 360 度的桌子上。我们记录了扫描得到的最高准峰

CISPR 32 的辐射发射限值取决于目标设备的分类、测量频率范围以及测量中所用屏蔽室的大小。

在 CISPR 32 中, 规定所有 EUT 的辐射发射限值在 30MHz 至 1GHz 频率范围内, 当 F_x 大于 1GHz 时, 辐射发射限值最高可达 6GHz。**表 2 和表 3** 分别列出了 A 类和 B 类限制的辐射发射限值, 以分贝 (微伏/米) 为单位。**图 3 和图 4** 绘制了 10m 和 3m 屏蔽室的 A 类和 B 类限制 [4, 11]。

表中的带宽设置代表频谱分析仪的分辨率带宽 (RBW)。在扫描整个频率范围时, 较窄的 RBW 可提供更好的频率分辨率, 并能区分频率相近的谐波分量。不足之处是需要更长的扫描时间。辐射发射测试的 RBW 为 120kHz, 传导发射测试的 RBW 为 9kHz。

通常, 开关模式电源的时钟低于 1GHz, 因此除非所用设备的时钟大于 1GHz (例如在 PC 中), 否则更高频率的限制将不适用。为简单起见, 我们在图中将最大值限制为 1GHz, 与应用于直流/直流转换器的频率相同。

| 频率范围 (MHz) | 测量 | | A 类限制 (dB [$\mu\text{V}/\text{m}$]) |
|------------|---------------------|-----------------|---------------------------------------|
| | 距离 ¹ (m) | 检测器类型/带宽 | |
| 30-230 | 10 | 准峰值/ 120 kHz | 40 |
| 230-1,000 | | | 47 |
| 30-230 | 3 | | 50 |
| 230-1,000 | | | 57 |

¹在整个频率范围内仅应用 10m 或 3m 的限值。

表 2. CISPR 32 A 类设备在高达 1GHz 频率时的辐射发射要求。

| 频率范围 (MHz) | 测量 | | B 类限制 (dB [$\mu\text{V}/\text{m}$]) |
|------------|---------------------|-----------------|---------------------------------------|
| | 距离 ¹ (m) | 检测器类型/带宽 | |
| 30-230 | 10 | 准峰值/ 120 kHz | 30 |
| 230-1,000 | | | 37 |
| 30-230 | 3 | | 40 |
| 230-1,000 | | | 47 |

¹在整个频率范围内仅应用 10m 或 3m 的限值。

表 3. CISPR 32 B 类设备在高达 1GHz 频率时的辐射发射要求。

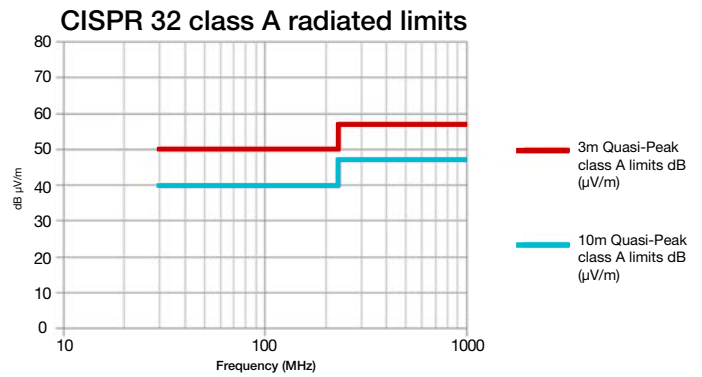


图 3. 表 2 中定义的 3m 和 10m 屏蔽室 A 类设备辐射发射限值的图示。

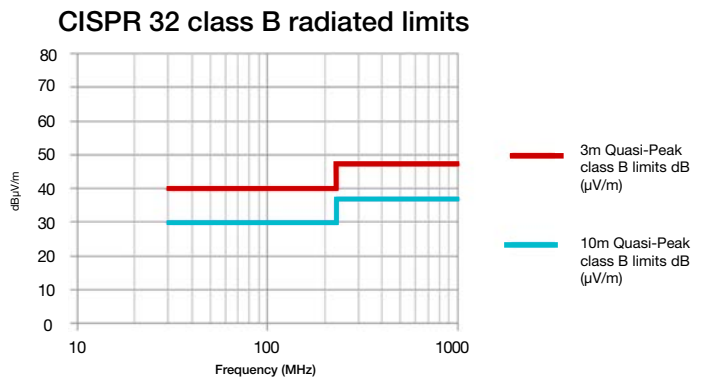


图 4. 表 3 中定义的 3m 和 10m 屏蔽室 B 类设备辐射发射限值的图示。

传导发射

图 5 说明了传导发射测试的布置 [1]。将 EUT 放在不导电的桌子上, 该桌子位于水平接地平面上, 并且紧挨垂直接地平面。

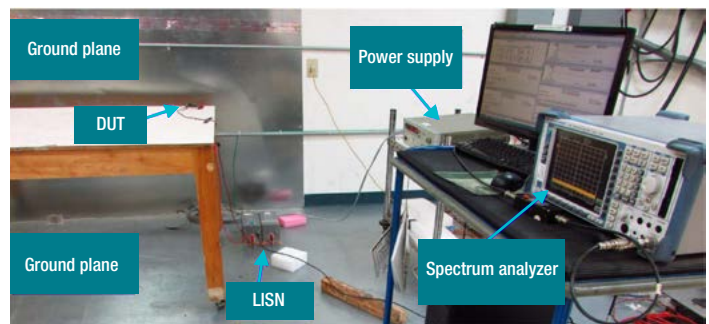


图 5. 桌面设备测试布置示例 (传导发射测量) [1]。

传导发射 EMI 测试需要一个线路阻抗稳定网络 (LISN)。LISN 是一种低通滤波器, 通常放置在输入电源和 EUT 之间。图 6 显示了测试中使用的典型 50 μH LISN。电源连接到 LISN 的 LINE 侧。在 EUT 侧, 频谱分析仪进行扫频, 并连接到 LISN 的

一个 50Ω 输出端，而 50Ω 终端器连接到 LISN 的另一个 50Ω 输出端。另外还要进行一次扫频，但需要交换 50Ω 终端器和频谱分析仪连接的 50Ω 输出端。

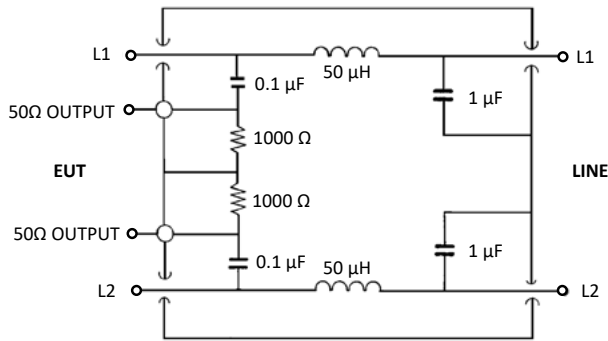


图 6. 用于 CISPR 32 传导发射测量的典型 50μH LISN [5]。

CISPR 32 传导发射限值定义在 150kHz 至 30MHz 的频率范围内。

图 4 和图 7 分别列出并说明了 A 类设备的传导发射要求 [4, 12]。

| 频率范围 (MHz) | 耦合器件 | 检测器类型/带宽 | A 类限制 ^{1,2} (dB [μV]) |
|------------|------|----------|--------------------------------|
| 0.15-0.5 | LISN | 准峰值/9kHz | 76-66 |
| 0.5-5 | | | 66 |
| 5-30 | | | 70 |
| 0.15-0.5 | LISN | 平均值/9kHz | 66-56 |
| 0.5-5 | | | 56 |
| 5-30 | | | 60 |

¹ 下限适用于过渡频率。
² 该限值随频率对数呈线性下降，范围为 0.15MHz 至 0.50MHz。

表 4. A 类设备交流电源端口的传导发射要求。

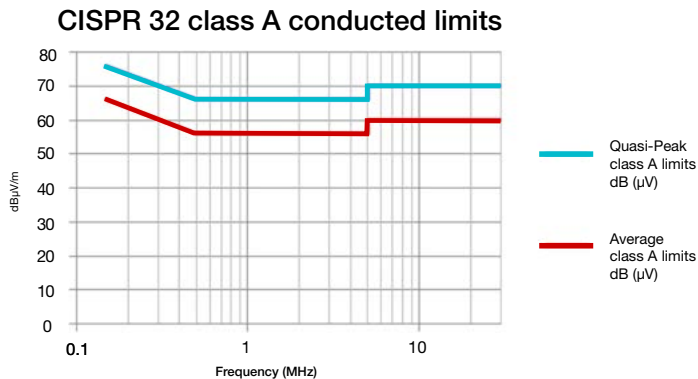


图 7. 表 4 中定义的 A 类设备交流电源端口传导发射限值的图示。

图 5 和图 8 分别列出并说明了 B 类设备的传导发射要求 [4, 12]。

| 频率范围 (MHz) | 耦合器件 | 检测器类型/带宽 | B 类限制 ^{1,2} (dB [μV]) |
|------------|------|----------|--------------------------------|
| 0.15-0.5 | LISN | 准峰值/9kHz | 66-56 |
| 0.5-5 | | | 56 |
| 5-30 | | | 60 |
| 0.15-0.5 | LISN | 平均值/9kHz | 56-46 |
| 0.5-5 | | | 46 |
| 5-30 | | | 50 |

¹ 下限适用于过渡频率。
² 该限值随频率对数呈线性下降，范围为 0.15MHz 至 0.50MHz。

表 5. B 类设备交流电源端口的传导发射要求。

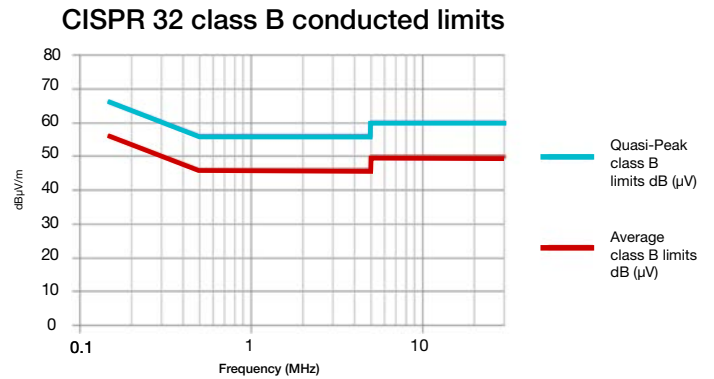


图 8. 表 5 中定义的 B 类设备交流电源端口传导发射限值的图示。

EMI 的常见原因

如图 9 所示，可以将 EMI 问题归类为“噪声源-噪声路径-受扰对象”模型。在开关模式电源中，噪声源通常是指开关操作产生的噪声。当供电设备打开和关闭时，来自电源环路的外部电流会对寄生电容器进行充电或放电。当开关速度非常快时，电压 (dv/dt) 或电流 (di/dt) 的压摆率将很高。共模噪声电流会流过功率金属氧化物半导体场效应晶体管的漏极或绝缘栅双极晶体管的集电极与散热器之间的寄生电容器。返回路径可以接地并返回功率级，这是导电 EMI 路径的一个示例 [6]。

噪声路径也可以指信号布线或电源导体之间的辐射耦合路径。电源/接地层通常充当谐振频率下不需要的贴片天线。集成电路通常太小而无法自行发出大量辐射。为了辐射足够强的磁场以引起干扰问题，能量必须从集成电路封装中耦合到充当天线的较大结构（例如印刷电路板 (PCB) 平面、散热器或电缆）。

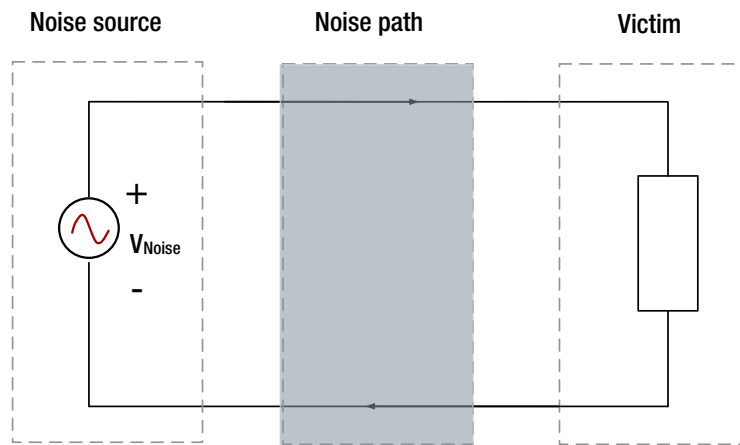


图 9. EMI 发射模型。

天线是辐射发射的干扰对象。LISN 是传导发射的干扰对象，与 EMI 接收器一起用于测量噪声。

隔离变压器引起的 EMI

隔离式电源转换器会跨隔离栅传输能量。输入和输出平面形成一个自然偶极天线。如图 10 所示，共模电流会流经变压器初级和次级绕组之间的寄生电容，然后通过输入至输出偶极双臂之间的寄生电容返回。

PCB 平面的尺寸决定了偶极天线的尺寸；变压器的面积以及绕组之间的距离决定了绕组间的电容。此共模电流会产生辐射 EMI 噪声。随着电流的增加，辐射能量也增加。

EMI 降低方法

管理 EMI 的最常见方法之一是使用更好的开关控制方案从源头降低 EMI。例如，较大的栅极阻抗会降低开关速度，从而降低开关节点电压 (V_{SW}) 的压摆率。通过降低高频极点的拐点，您可以实现共模噪声衰减。在关断时间结束时，与寄生电容器谐振的环路电感会在 V_{SW} 上引起高频振铃。为了减少过冲并保护器件，可选择电阻器-电容器二极管或其他缓冲电路。软开关过渡技术是控制 dv/dt 并消除开关节点高频噪声的另一种常用方法。

选择合适的开关频率可更大程度降低对 EMI 滤波器的要求，更小的开关频率可以降低 EMI 噪声，但代价是要采用大型的无源器件。一种常见的折衷办法是将开关频率设置为大约 70kHz，使开关电流的一次谐波和二次谐波分量低于 CISPR 传导 EMI 标准的下限频率 (150kHz)。或者，也可将开关频率大幅增大到几百千赫或兆赫，通过高交叉频率来减小滤波器的尺寸。此方法通常与软开关方法结合使用。

扩频调制是降低 EMI 的另一种方法。基本原理是将频率变化

控制在标称值的百分之几以内。这种做法是将 EMI 扩展到更宽的频率范围，而不是集中于标称频率。关键是在电路的容限范围内调制时钟，而又不破坏其他控制或通信电路。

调制曲线是指描述频率变化的曲线形状。常规调制曲线包括正弦波形和三角波形。另一种随机载波频率调制可在保持理想占空比的同时随机改变开关频率，因此比标准曲线具有更多优势。

隔离式电源变压器设计的主要权衡是在电感、耦合和寄生电容之间实现平衡。为了满足共模瞬态抗扰度要求并减少 EMI 噪声，需要限制绕组间电容值。

隔离式直流/直流偏置电源器件

德州仪器 (TI) 的 [UCC12050](#) 是隔离式直流/直流转换器和模块系列采用 TI 集成变压器技术的先进器件。该产品易于使用，仅需输入和输出电容器。其额定输入电压为 5V +10%，并提供隔离式 3.3V、3.7V、5V 或 5.4V 输出电压，输出功率超过 500mW。UCC12050 具有增强型隔离功能，而其姊妹产品 [UCC12040](#) 则是用于基础型隔离 [7, 8]。图 11 所示为 UCC12050 的评估模块 [9]。



图 11. 德州仪器 (TI) UCC12050 的评估模块。

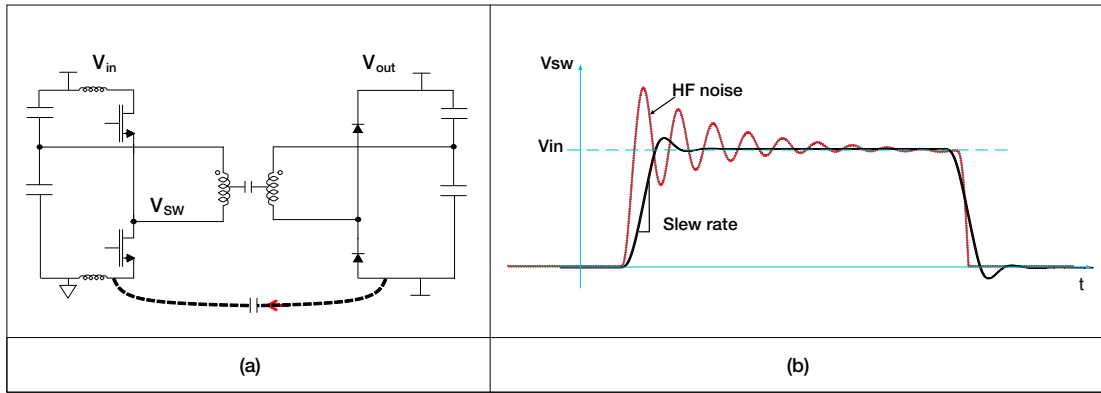


图 10. 隔离式直流/直流转换器的共模电流 (a); 开关节点波形 (b)。

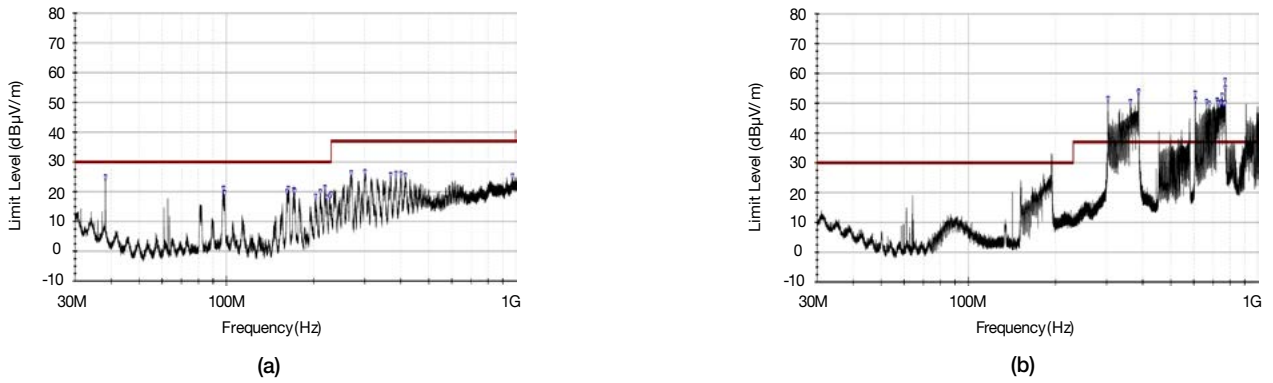


图 12. UCC12050 (a) 以及竞争器件 (b) 在 30MHz 至 1GHz 下的 CISPR B 类辐射发射。

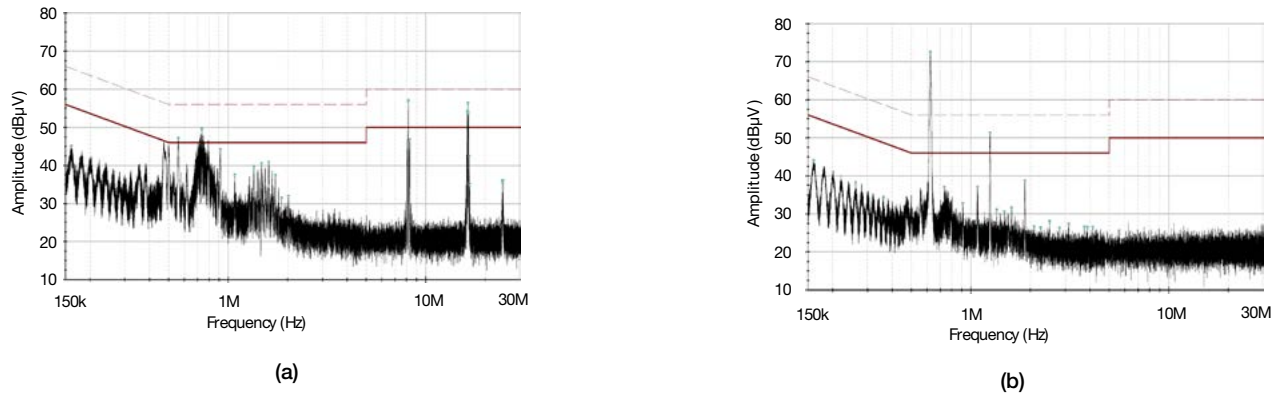


图 13. UCC12050 (a) 以及竞争器件 (b) 在 150kHz 至 30MHz 下的 B 类传导发射。

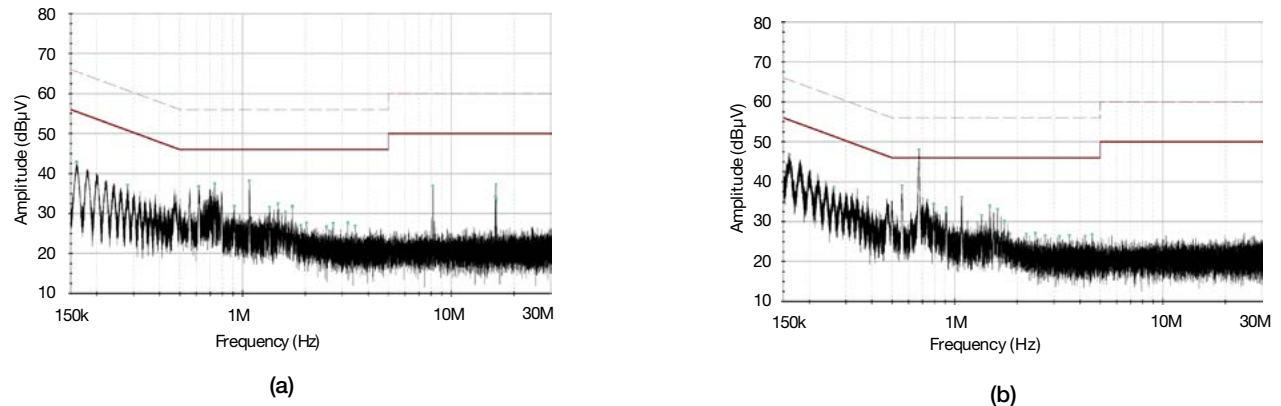


图 14. 采用 1,500Ω (100MHz) 输入铁氧体磁珠时的 UCC12050 (a) 以及竞争器件 (b)。

UCC12050 和 UCC12040 针对低 EMI 进行了优化,即利用扩频调制并在初级侧与次级侧之间采用低电容值。**图 12** 是 UCC12050 与同类竞争器件的辐射发射性能比较。该测试根据 CISPR 32 标准使用水平天线在 10m 距离处进行,在 5V 输入电压、5V 输出电压和 500mW 输出功率下对两款器件进行同类比较,测试设置为采用两层 PCB,无铁氧体磁珠,无低压降稳压器,且初次级不共地。TI 的 UCC12050 提供了 5dB μ V/m 的裕度,达到 B 类准峰值限制,且其峰值比竞争器件低 25dB μ V/m 以上。

在相同的工作条件下,UCC12050 在 CISPR 32 B 类传导发射方面的表现优于竞品。**图 13** 显示了这两个器件相对的虚线准峰值和实线平均限值。

通过使用两个小输入 0603 铁氧体磁珠(100MHz 时为 1,500 Ω)进行额外改进,可以进一步降低传导发射。**图 14** 显示了该数据。

同样,可以通过在两个内层内实施缝补电容器来进一步改善布局。**图 15** 所示为添加一个缝补电容器的示例,其中两个内层在该器件下方的接地层重叠。我们建议仔细监控尺寸以保持适当的隔离级别 [10]。该监控主要有助于高频共模去耦,以便进一步降低辐射发射,并可以在 B 类准峰值限值内实现大于 9dB μ V/m 的裕度。

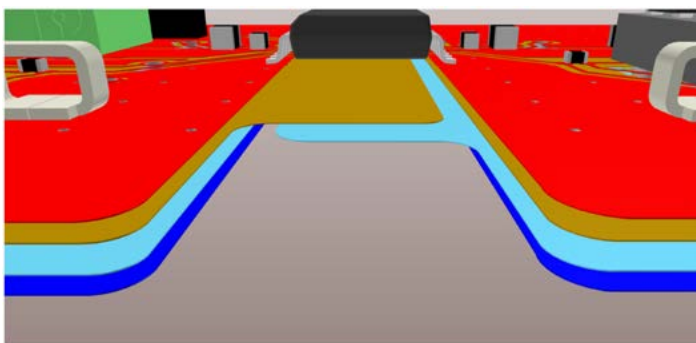


图 15.内层之间的可选缝补电容器可进一步降低德州仪器(TI) [UCC12050 评估模块](#)上的辐射发射。

图 16 显示了结合使用缝补电容器和两个内层、未使用铁氧体磁珠时的辐射发射数据。

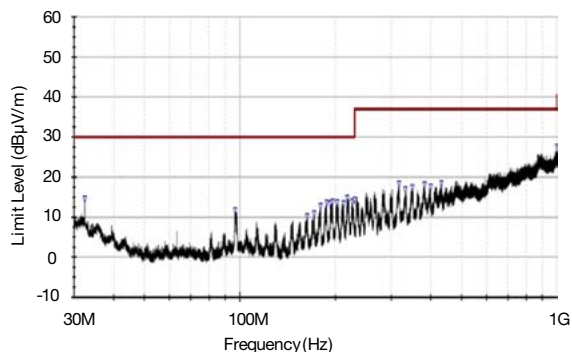


图 16.使用缝补电容器、未使用铁氧体磁珠的 UCC12050 在 30MHz 至 1GHz 下的 CISPR B 类辐射发射。

结束语

通过在设计的早期阶段考虑如何控制 EMI,可以减少隔离式直流/直流电源转换器在认证时的风险和麻烦。为了管理 EMI,可以了解阈值限制,然后研究降低发射的原因和方法,从而将发射值保持在行业标准以下。TI 高度集成的 UCC12050 隔离式直流/直流模块在设计时就考虑了 EMI 控制,可满足 CISPR 32 标准的辐射发射和传导发射要求,并且不需要铁氧体磁珠,从而节省了布板空间和成本。

参考文献

1. National Technical Systems, “PR102554 Texas Instruments CE Mark Report Rev. 1,” Electromagnetic Compatibility (EMC) Requirements EN55032 Test Report for UCC12050, CISPR 32 Radiated and Conducted Emissions Certification Report, September 2019.
2. Daniel Hoolihan, www.interferencetechnology.com.
3. Dorine Gurney, [“EMI emissions testing: peak, quasi-peak and average measurements,”](#) EDN, July 10, 2018.
4. International Electrotechnical Commission (IEC), “EN 55032/CISPR 32, Electromagnetic Compatibility of Multimedia Equipment – Emission Requirements,” Ed.2.0 2015-03.
5. Fischer Custom Communications, “Standard 50-Ω LISN for CISPR 16,” data sheet, 2015.
6. Krishna Mainali 和 Ramesh Oruganti, [“Conducted EMI Mitigation Techniques for Switch-Mode Power Converters: A Survey,”](#) IEEE Transactions on Power Electronics 25, no. 9 (September 2010): 2344-2356.
7. [《UCC12050 高效率、低 EMI、5kVRMS 增强型隔离式直流/直流转换器》](#), 德州仪器 (TI) 数据表 SNVSB38C, 2020 年 4 月。
8. [《UCC12040 高效率、低 EMI、3kVRMS 基础型隔离直流/直流转换器》](#), 德州仪器 (TI) 数据表 SNVSB05A, 2020 年 4 月。
9. [《UCC12050EVM-022 用户指南》](#), 德州仪器 (TI) 用户指南 SLUUBD5, 2019 年 9 月。
10. 《采用 ISOW7841 集成信号和电源隔离器的低发射设计》, 德州仪器 (TI) 应用报告 SLLA368C, 2019 年 2 月。
11. Timothy Hegarty, [《电源的辐射 EMI 规格概述》](#), 德州仪器 (TI) 白皮书 SLYY142, 2018 年 7 月。
12. Timothy Hegarty, [《电源的传导 EMI 规格概述》](#), 德州仪器 (TI) 白皮书 SLYY136, 2018 年 2 月。

UCC12050 和 UCC12040 针对低 EMI 进行了优化,即利用扩频调制并在初级侧与次级侧之间采用低电容值。**图 12** 是 UCC12050 与同类竞争器件的辐射发射性能比较。该测试根据 CISPR 32 标准使用水平天线在 10m 距离处进行,在 5V 输入电压、5V 输出电压和 500mW 输出功率下对两款器件进行同类比较,测试设置为采用两层 PCB,无铁氧体磁珠,无低压降稳压器,且初次级不共地。TI 的 UCC12050 提供了 5dB μ V/m 的裕度,达到 B 类准峰值限制,且其峰值比竞争器件低 25dB μ V/m 以上。

在相同的工作条件下,UCC12050 在 CISPR 32 B 类传导发射方面的表现优于竞品。**图 13** 显示了这两个器件相对的虚线准峰值和实线平均限值。

通过使用两个小输入 0603 铁氧体磁珠 (100MHz 时为 1,500 Ω) 进行额外改进,可以进一步降低传导发射。**图 14** 显示了该数据。

同样,可以通过在两个内层内实施缝补电容器来进一步改善布局。**图 15** 所示为添加一个缝补电容器的示例,其中两个内层在该器件下方的接地层重叠。我们建议仔细监控尺寸以保持适当的隔离级别 [10]。该监控主要有助于高频共模去耦,以

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。TI 建议用户在下订单前查阅全面的全新产品与服务信息。TI 对应用帮助、客户应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不承担任何责任。有关任何其他公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的批准、担保或认可。

所有商标均为其各自所有者所有。

重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 (<https://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com.cn](https://www.ti.com.cn) 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。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122

Copyright © 2021 德州仪器半导体技术（上海）有限公司