

Technical Article

如何表征电源变压器的电磁干扰 (EMI) 性能



Brian King

在隔离式开关电源转换器中，电源变压器通常是共模噪声的主要来源。为什么？因为在变压器内部，处于隔离屏障两侧的原边绕组与副边绕组间距极小（通常不足 1 毫米），这使得相邻绕组间产生了明显的寄生电容。

这些绕组上所呈现的电压，往往包含比较高的交流分量。以图 1 中的反激式转换器为例，原边绕组连接至原边开关的漏极，此漏极的电压波形在多个频段呈现高交流分量。该交流电压会借助寄生电容，从原边向副边注入共模电流，而这恰恰是众多电磁干扰 (EMI) 问题的主要成因。

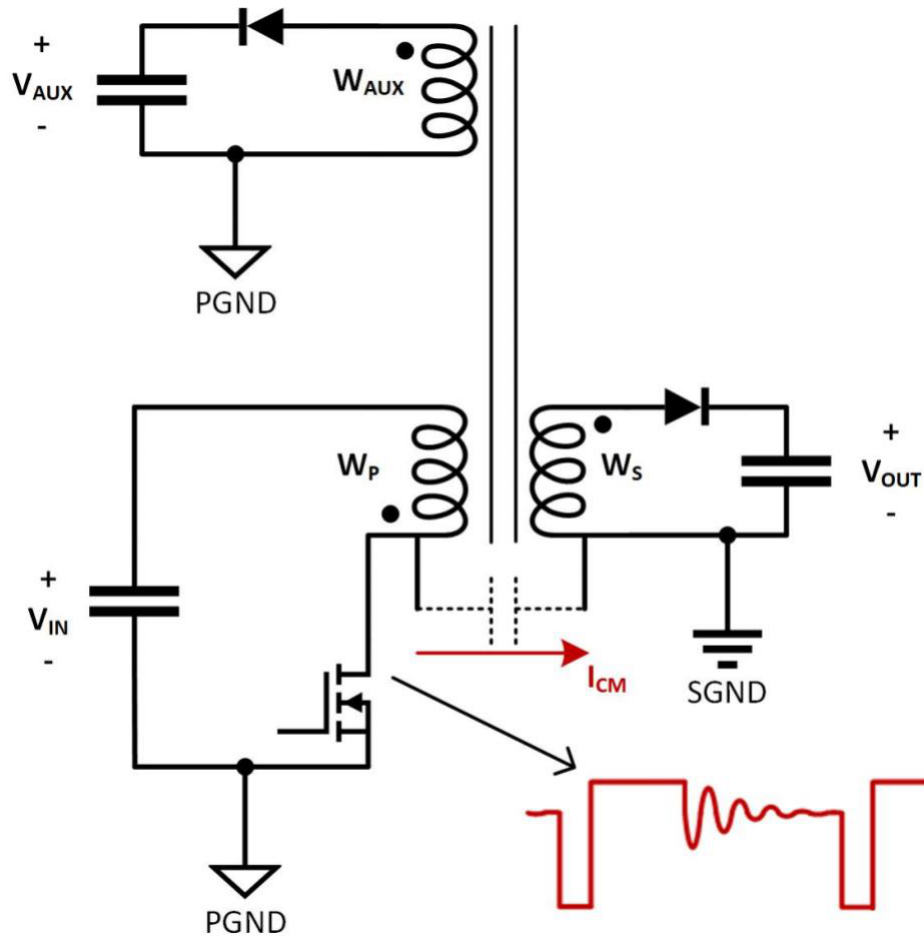


图 1. 反激式电源变压器引发的共模噪声问题。来源：德州仪器 (TI)

幸运的是，诸如屏蔽技术和共模平衡等变压器设计策略，能够最大程度削弱变压器对电磁干扰 (EMI) 的负面影响，相关探讨已收录于德州仪器电源设计研讨会论文《兼顾效率提升与电磁干扰抑制的反激式变压器设计要点》（“Flyback Transformer Design Considerations for Efficiency and EMI”）中。然而，要精准评估变压器对电磁干扰的具体影响程度，并据此优化其结构设计，通常既具挑战性又耗时冗长。针对每一个待测试的变压器设计方案，都必须先将变压器焊接至印刷电路板 (PCB)，再将电源转换器放入电磁干扰 (EMI) 测试夹具内进行扫描测试。若测试结果显示变压器的电磁干扰性能未达标准，则还需将其从印刷电路板 (PCB) 上拆下，并重试。

在本期电源设计小贴士中，我将分享一种极为便捷的方法，让您在将变压器焊接至电路板之前，就能预先检测其电磁干扰 (EMI) 性能。

仅需一台函数发生器和一台示波器，即可模拟变压器在电路中的实际工作条件，并测量其共模电磁干扰 (EMI) 特性。图 2 的图中展示了针对图 1 中变压器进行此项测量的具体配置方法。注意：此变压器原边配置有两个绕组（分别为 W_P 和 W_{AUX} ），副边配置有一个绕组（ W_S ）。

首先，用一小段导线将原边的交流静点 (AC quiet node) 相互连接。这里的交流静点指电路中直接或通过电容连接到原边接地的变压器引脚。在本例中，引脚 2 和引脚 3 均为隔离屏原边障侧的交流静点。如果变压器副边配有多绕组，也需将所有副边静点连接在一起，但务必注意，切不可将其与原边静点相连。

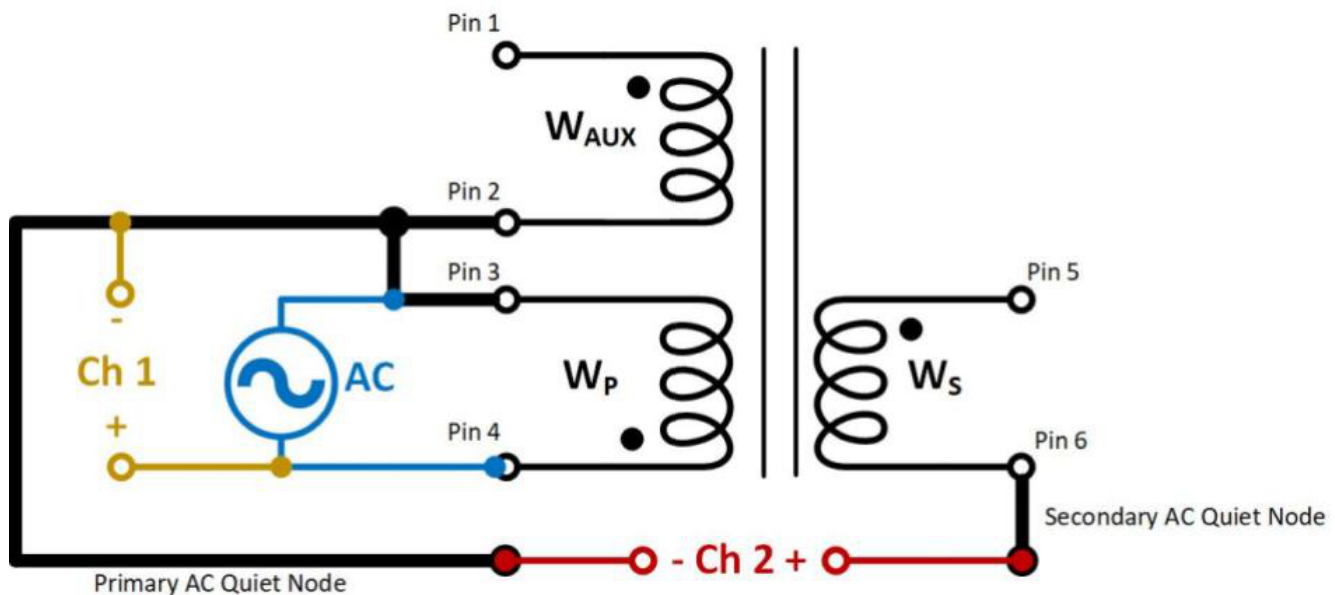


图 2. 变压器共模抑制比 (CMRR) 测试配置方案：用一小段导线，将原边与副边的交流静点 (AC quiet node) 分别进行连接，随后在原边绕组上施加一个小幅正弦波信号，通过测量原副边交流静点间的感应电压与函数发生器注入电压的比值，即可得出共模抑制比 (CMRR)。来源：德州仪器 (TI)

随后，借助函数发生器，在变压器原边绕组上施加一个小幅正弦波信号。这一操作能够模拟原边绕组电压，但此时是在单一频率下，采用安全且低电压的方式进行测试。信号幅度的大小在此并不关键，因为变压器的寄生电容在很大程度上并不受电压幅度的影响。

最后，利用示波器的一个通道，对函数发生器注入的电压进行测量。同时，使用另一个通道，测量原边与副边交流静点之间所感应产生的电压。这两个信号的比值，本质上就是共模抑制比 (CMRR)，能够直观反映出在该频率下，电源变压器对共模噪声的贡献程度。

图 3 展示了在 100 kHz 特定频率下，针对两款不同变压器进行该测试所得到的结果。1 号变压器采用的结构设计，使其共模抑制比 (CMRR) 达到了 -39.6dB；相比之下，2 号变压器的共模抑制比数值更高，为 -31.4dB。这表明 1 号变压器产生的共模噪声比 2 号变压器小。借助函数发生器，可以深入探究变压器在不同频率下呈现出的特性表现。

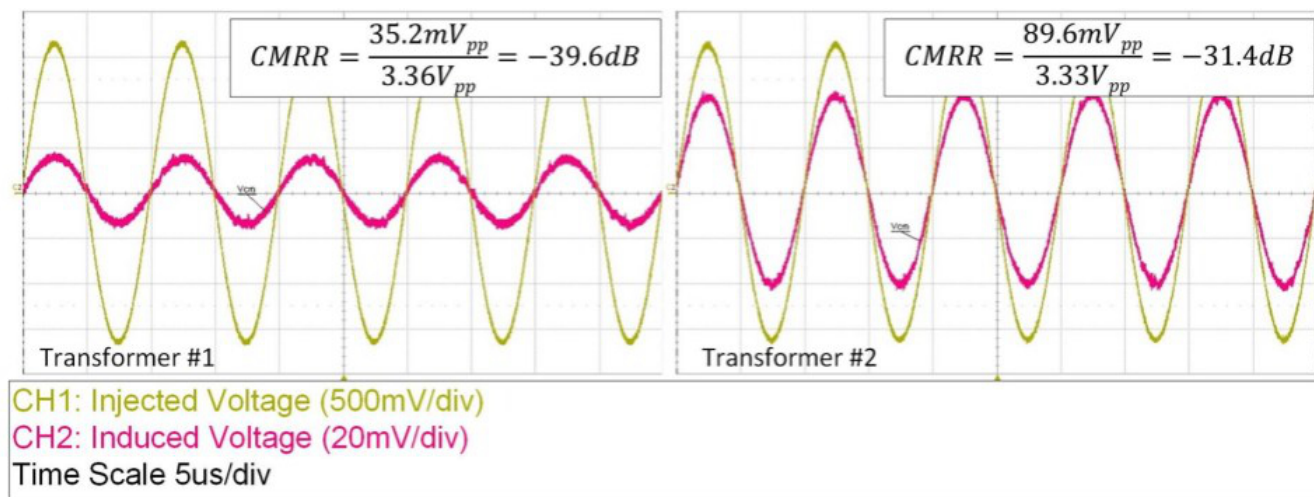


图 3. 时域变压器共模抑制比 (CMRR) 测试结果表明, 在 100 kHz 这一测试频率点上, 1 号变压器产生的共模噪声低于 2 号变压器。来源: 德州仪器 (TI)

此外, 也可使用频率响应分析仪 (FRA) 进行同样的测试, 通过扫描注入信号的频率, 全面覆盖整个感兴趣的频段范围。图 4 呈现了这两款变压器在 100kHz 至 30MHz 宽频范围内的频率响应分析仪 (FRA) 测量数据。注意, 在 100kHz 至约 4MHz 的宽频区间内, 增益十分平稳。100kHz 处的增益与函数发生器测试结果高度相符, 说明在 100kHz 下开展的函数发生器测试, 足以准确表征这两款变压器在该频段内的特性。当频率高于几兆赫兹时, 您应在感兴趣的特定频率点测量这些变压器的共模抑制比 (CMRR)。

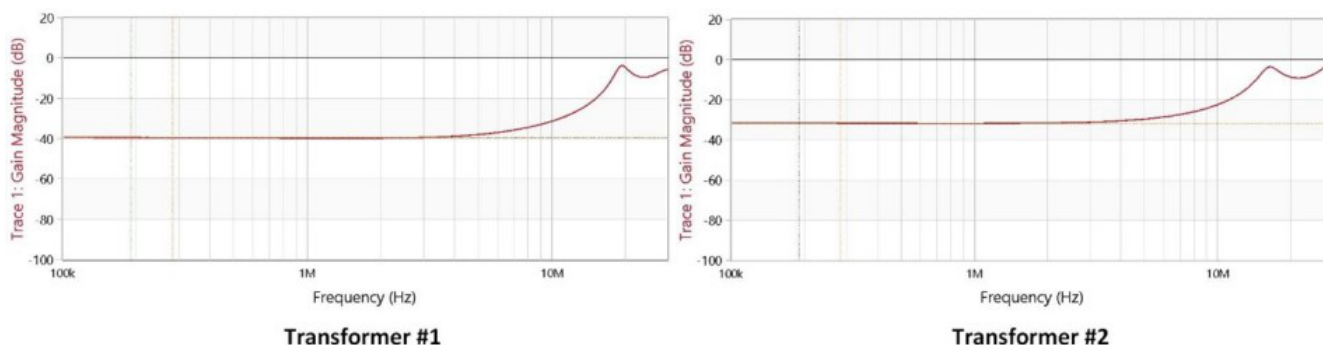


图 4. 使用频率响应分析仪 (FRA) 在 100kHz 至 4MHz 宽频范围内对 1 号变压器和 2 号变压器进行频域共模抑制比 (CMRR) 测试的结果。来源: 德州仪器 (TI)

图 5 展示了将两款变压器焊接至开关电源转换器印刷电路板 (PCB) 后, 依据国际无线电干扰特别委员会 (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques, CISPR) 32 B 类限值标准, 测得的传导电磁干扰 (EMI) 特性。其中, 上限线代表准峰值测量结果, 下限线代表平均值测量结果。测试结果表明, 2 号变压器的电磁干扰 (EMI) 结果比 1 号变压器差, 符合预期。实际上, 1 号变压器以较大裕量通过测试, 而 2 号变压器以微小差距未通过测试。

Quasi-peak Scan Average Scan

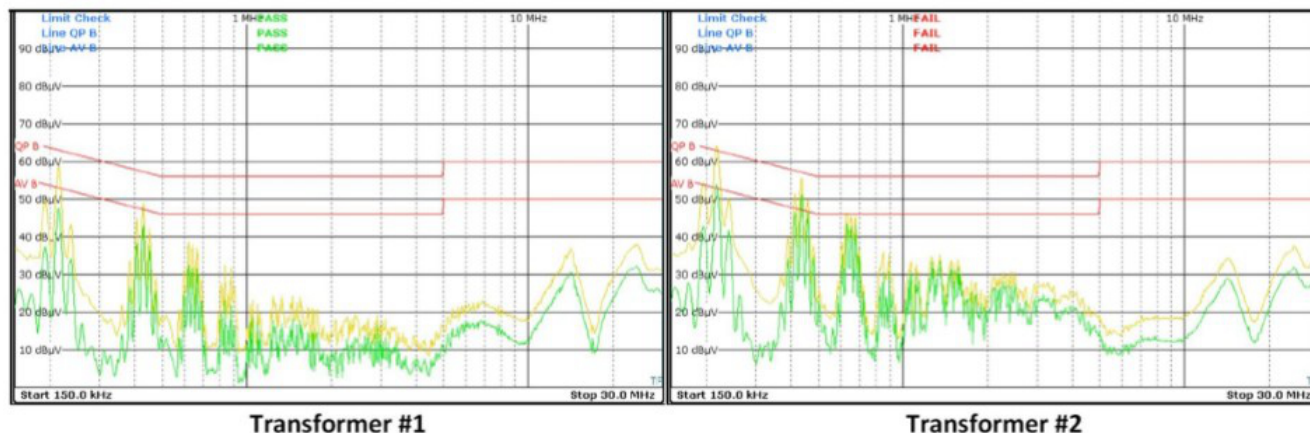


图 5. 两款变压器的传导电磁干扰 (EMI) 测试结果：1 号变压器以较大裕量通过测试，2 号变压器以微小差距未通过测试。来源：德州仪器 (TI)

有趣的是，本案例涉及的两款变压器在绕组结构与制造工艺上完全一致。共模抑制比 (CMRR) 的差异，完全归因于制造过程中微小工艺参数的波动，表明电磁干扰 (EMI) 性能对变压器制造细节具有高度敏感性。即便是细微差异（例如变压器内部单根导线的精确布放位置或绝缘层厚度的细微变化）也可能产生显著影响。

就本例的变压器制造实践而言，显然无法保证所有量产产品均稳定通过 CISPR 32 传导电磁干扰 (EMI) 限值测试。为解决这一问题，一个办法是在电路中增强电磁干扰 (EMI) 滤波，以提升裕量。还有一个办法是在生产过程中，利用函数发生器对每台变压器样品进行逐一筛选测试。该筛选测试方法与变压器绕组匝数比的常规筛选测试方法高度相似，因此无需额外配置专用测试设备。在本例中，只有通过筛选测试且共模抑制比 (CMRR) 低于 -38dB 的变压器可确保其组装为电源转换器系统后，所有产品均具备高概率通过电磁干扰 (EMI) 测试的可靠性。

变压器对电磁干扰 (EMI) 的影响

调试电磁干扰 (EMI) 问题时，常面临诸多阻碍与挑战。使用本期电源设计小贴士中介绍的简易测量方案可显著缩短您在焊接调试与实验室测试中的用时，缓解调试过程中的挫败情绪。建议在开展下一款隔离电源设计时，先对电源变压器的共模抑制比 (CMRR) 进行快速测量，完成后再将其焊接至电路板，最后将实测 CMRR 数据与电磁干扰 (EMI) 测试结果进行对比分析。这样做，您可以更透彻地掌握变压器对电磁干扰的影响，并了解在您的系统中，变压器需达到何种 CMRR 性能指标才能确保通过电磁干扰 (EMI) 测试。

相关内容

- 电源技巧 118：使用交错接地平面改善隔离式电源噪声滤波
- 电源技巧 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
- 电源技巧 115：GaN 开关集成如何在 PFC 中实现低 THD 和高效率
- 电磁干扰 (EMI) 发射测试：峰值、准峰值与平均值测量
- 罐形磁芯存在固有局限

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