

Daniel Norwood

HVP-HPD

噪声是一直困扰栅极驱动电路的难题。无论是电源纹波还是功率 FET 栅极的振铃，噪声都会导致不可预测的行为并降低系统可靠性。铁氧体磁珠是工程师用于防止此类损害的工具之一。这种方法很有效，因为铁氧体磁珠可以减弱高频振铃，同时对正常运行的影响非常小。本应用简报旨在介绍铁氧体磁珠的基础知识、栅极驱动电路中的振铃来源以及如何使用铁氧体磁珠来解决振铃问题。本文档中的材料适用于任何使用栅极驱动电路的人员，但在使用涉及高开关频率或功率 FET 快速 dV/dt 的系统时尤其重要。

铁氧体磁珠基础知识

铁氧体磁珠是由铁氧体（一种具有磁性的陶瓷材料）包围的导体。铁氧体磁珠的电阻、电容和电感特性与频率相关。通常，铁氧体磁珠的频率响应主要取决于其低频下的电感分量和较高频率（接近自谐振频率 (SRF)）下的电阻分量。在高于 SRF 的频率下，电容分量成为主导。图 1 显示了一个等效电路模型，用于演示铁氧体磁珠的谐振行为。在实践中，这意味着铁氧体磁珠允许某些频率范围内的信号通过且产生很小的影响，但在较高频率下会以热量的形式将其他信号消散。虽然铁氧体磁珠与具有低 Q 系数的电感器类似，但需要注意的是，铁氧体磁珠实际上会消耗能量，与存储能量的电感器相反。这样可以选择铁氧体磁珠，从而降低目标频率下的噪声，而不会导致原始信号显著失真。

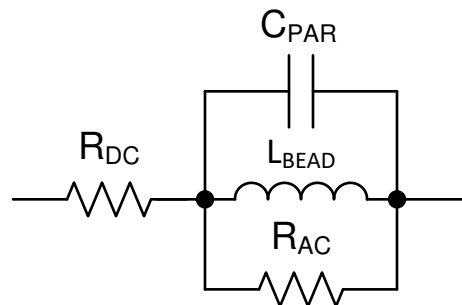


图 1. 铁氧体磁珠等效电路

栅极驱动电路中的噪声

在栅极驱动电路中，栅极上的噪声可能有多个来源，包括栅极驱动器电源的辐射噪声和传导噪声。然而，重要的噪声源是功率 FET 栅极由于图 2 中所示的寄生效应而产生的寄生振荡。FET 布线和引线的寄生电感与寄生电容 C_{gd} 和 C_{gs} 相结合，形成一个 RLC 振荡环路。当 FET 开始导通时， di/dt 会导致寄生电感上产生振铃，寄生电感通过 C_{gd} 耦合到 FET 的栅极。在 FET 完全导通并在其线性区域中运行之前，FET 最初会进入饱和区域，该饱和区域具有较高 g_m 增益，这通常不适合电力电子系统。在此饱和阶段，FET 放大从栅极到漏极的振荡，漏极可以通过 FET C_{gd} 耦合，从而形成正反馈环路。

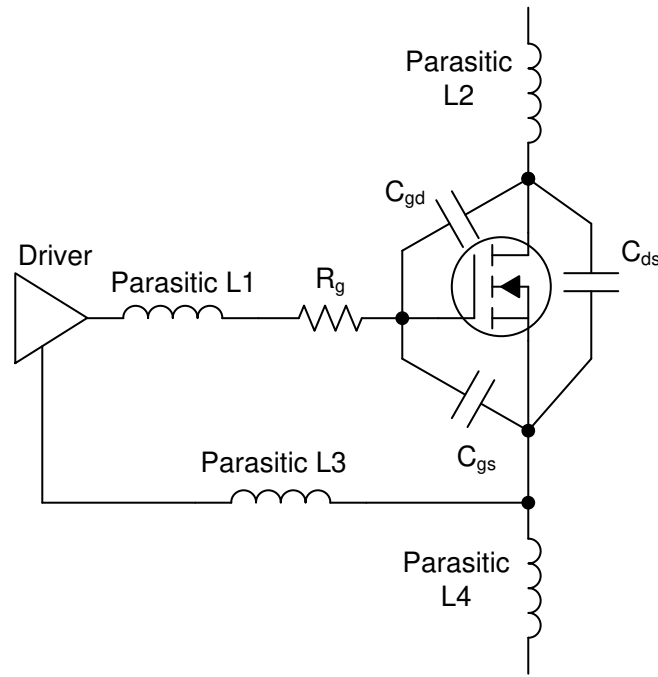


图 2. 栅极驱动电路中的寄生效应

通过布局优化减少寄生效应，可以减少这种振铃，但功率 FET 本身具有较大的寄生电容，并且由于系统级的其他因素，有时很难减小寄生电感。解决此问题的另外两种方法是增大栅极电阻（这有助于抑制振荡），或在栅极到源极之间添加一个额外的电容器，从而需要更多电荷才能开启 FET。虽然这两个选项均可有效减少振铃，但需要权衡取舍，因为它们都会增加 FET 的开关时间，从而限制了驱动电流（在栅极电阻器情况下）或增加了开启 FET 所需的电荷（在电容器情况下）。由于开关时间增加，开关损耗也会增加，从而降低效率。该效率降低强调了这样的需求，即在不显著影响栅极驱动电路的开关速度和效率的情况下，需要一种方法来抑制这些振荡。

使用铁氧体磁珠降低栅极驱动电路中的噪声

铁氧体磁珠非常适合在栅极驱动应用中用于减少开关栅极节点上的振铃和噪声。过去，电阻器用于降低此栅极噪声，但使用电阻器会降低最大驱动电流，从而降低开关速度并增加开关损耗。可以选择铁氧体磁珠来消除噪声，而不会显著降低峰值驱动强度，从而使功率晶体管的开关行为相对不变。下面的波形显示了在栅极和输出之间未采用铁氧体磁珠（如图 3 所示）和采用铁氧体磁珠（如图 4 所示）时的噪声超结 MOSFET 开关。在这些图中，添加铁氧体磁珠会显著降低栅极振荡的幅度。建议在开关管的栅极使用铁氧体磁珠来提高驱动电路的可靠性，尤其是在开关有噪声 FET（例如具有快速上升时间或低内部栅极电阻的 FET）时。铁氧体磁珠可与栅极电阻器串联使用，以提供更大优势，如图 5 所示，并应尽可能靠近 FET 放置。

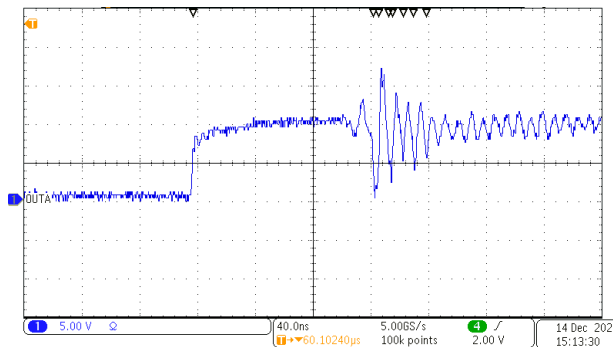


图 3. 未采用铁氧体磁珠时的栅极噪声

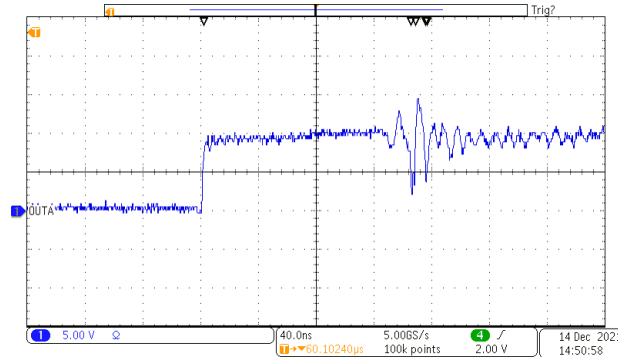


图 4. 采用铁氧体磁珠时的栅极噪声

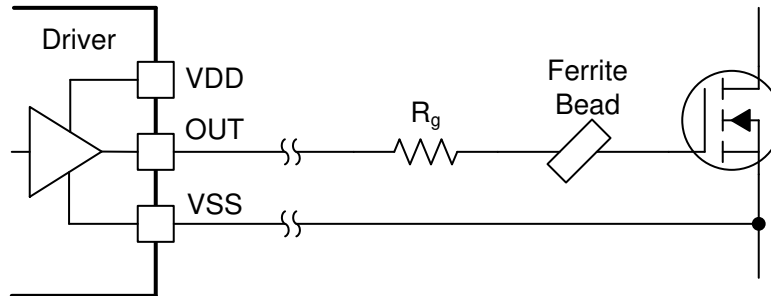


图 5. 铁氧体磁珠放置

很明显，铁氧体磁珠可以降低系统中的噪声，但也需要权衡取舍。向栅极驱动路径添加组件的一个常见问题是开关速度降低，这会导致效率降低。图 6 显示了采用铁氧体磁珠（蓝色）和不采用铁氧体磁珠（黑色）时超结 MOSFET 开关的上升栅极信号。观察这两个波形可以发现，铁氧体磁珠对正常运行的影响很小。

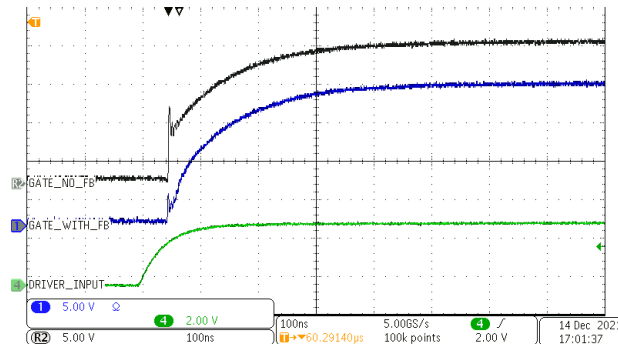


图 6. 铁氧体磁珠对正常开关的影响

选择铁氧体磁珠

在为栅极驱动应用选择铁氧体磁珠时，需要考虑两个主要因素：饱和电流和目标频率的阻抗。

选择铁氧体磁珠时，最好在驱动频率下具有超小阻抗，在噪声频率下具有高阻抗。通常，栅极振荡频率约为 100MHz，但也可以在系统中测量该噪声频率，以帮助选择合适的铁氧体磁珠。要选择合适的铁氧体磁珠，需要查看器件数据表上的频率与阻抗关系图。该图应包含三条线，总体阻抗 (Z)、阻抗的电感分量 (X) 和阻抗的电阻分量 (R)。选择的铁氧体磁珠应在噪声频率下更大限度提高电阻分量以消散尽可能多的能量，同时更大限度地降低开关频率下的总体阻抗，以防止不必要的损耗。图 7 显示了铁氧体磁珠阻抗的示例图（基于 TDK 的 MPZ1608 系列）。该图所示的铁氧体磁珠适用于很多栅极驱动应用，因为它在开关频率下的阻抗非常低（低于 1MHz），但在 10MHz 至 300MHz 的频率下具有高阻抗。

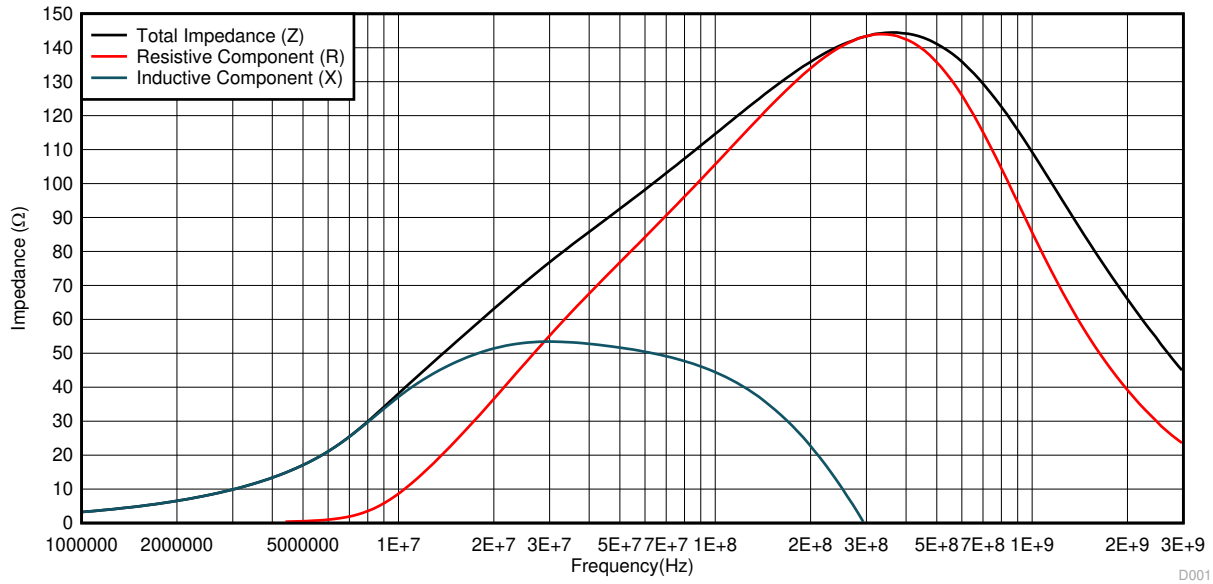


图 7. 铁氧体磁珠阻抗示例图

必须考虑的第二个因素是饱和电流，即铁氧体磁珠失效时的电流。铁氧体磁珠的性能在很大程度上取决于饱和电流，在达到额定电流之前衰减会发生很大变化。考虑到这一点，务必确保在峰值电流下保持足够高的阻抗，以充分衰减噪声。数据表中并不总是提供此信息，因此可能需要向铁氧体磁珠制造商索取此信息。

参考文献和其他资源

- 德州仪器 (TI), [外部栅极电阻器选型指南](#)
- TDK, [MPZ1608 铁氧体磁珠数据表](#)
- Toshiba, [功率 MOSFET 的寄生振荡和振铃](#)

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司