

铁氧体磁珠揭秘

作者：Jefferson Eco和Aldrick Limjoco

简介

高分辨率、高性能转换器和射频(RF)系统要求电源采用低噪声设计，以便实现最佳性能。这类设计需要在模拟域和数字域之间具有良好的电源噪声过滤以及高频串扰抑制性能，尤其是在混合信号转换器和接收机中。

在开关稳压器中，电源噪声尤为明显，这会产生干扰，并可能损害一切噪声敏感型系统。但是，由于开关稳压器具有高功率转换效率，因而通常用于需要延长电池寿命的便携式设备中，以及用于存在温度限制的系统中。

同类的混合信号IC数字和模拟电压供电轨通常采用不同的功率域供电。这样有助于防止快速数字开关噪声耦合至敏感的模拟电源供电轨并降低转换器性能，但会增加系统级复杂性和成本。针对电源域采取适当的高频隔离后，便可在模拟域和数字域之间共享电源，从而简化设计并降低成本。

过滤高频电源噪声并无干扰地共享同类电源供电轨的一种有效方法是使用铁氧体磁珠。铁氧体磁珠是无源器件，可在宽频率范围内过滤高频噪声。它在目标频率范围内具有电阻特性，并以热量的形式耗散噪声能量。铁氧体磁珠与供电轨串联，而磁珠的两侧常与电容一起接地。这样便形成了一个低通滤波器网络，进一步降低高频电源噪声。

图1显示了一个滤波方案示例，它常常用于混合信号IC中，隔离模拟和数字电源。该方案适用于一切分布式电源网络；但了解它的有效性和限制可帮助用户避免可能对高性能转换器应用造成伤害的特性(举例而言)。

本应用笔记讨论系统设计人员在电源系统中使用铁氧体磁珠时需要注意的重要考虑因素，包括铁氧体磁珠的响应特性、铁氧体磁珠简化模型和仿真、直流考虑因素、LC谐振效应以及阻尼方法。了解这些内容可使系统设计方法快速有效。

ADI公司应用铁氧体磁珠的产品是1.25 A、1.2 MHz同步降压开关稳压器(ADP2120)和带独立正输出和负输出的2 A/1.2 A DC-DC开关稳压器(ADP5071)。

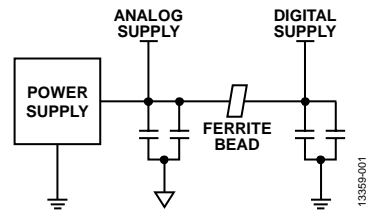


图1. 混合信号IC滤波器方案示例

目录

简介.....	1	LC谐振效应.....	6
修订历史.....	2	阻尼方法.....	9
铁氧体磁珠响应特性.....	3	结论.....	11
铁氧体磁珠简化模型与仿真.....	3	参考文献.....	11
直流偏置电流考虑因素.....	4		

修订历史

2015年8月—修订版0：初始版

铁氧体磁珠响应特性

铁氧体磁珠可依据三个响应区域分类：感性、阻性和容性。查看ZRX曲线便可确定这些区域，其中Z表示阻抗、R表示电阻、X表示磁珠的电抗。为了降低高频噪声，磁珠必须处于阻性区域内；电磁干扰(EMI)滤波应用尤其需注意这一点。该元件表现为电阻特性，可阻止高频噪声并以热量的形式耗散。阻性区域出现在磁珠交越频率(X=R)之后，直至磁珠变为容性的那一点为止(见图2)。此容性点位置为容性电抗绝对值等于R的频率处。

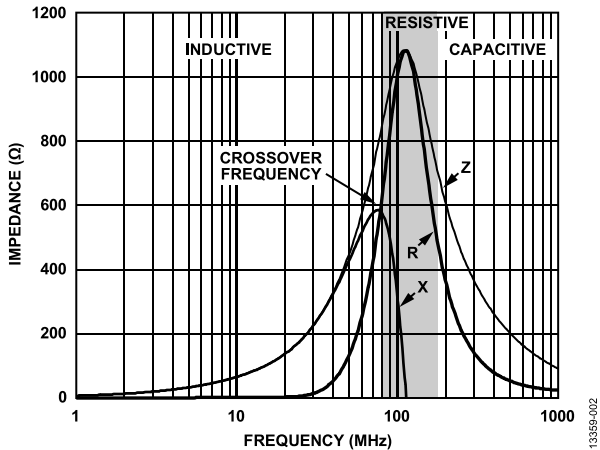


图2. Tyco Electronics BMB2A1000LN2 ZRX曲线

在交越频率以下相对较低的频率处，磁珠的响应是感性的。在高频率处，磁珠的响应是容性的。这种情况下，阻抗的下降斜率与频率曲线的关系由元件的寄生电容决定。

铁氧体磁珠简化模型与仿真

铁氧体磁珠能够建模为一个由电阻、电感和电容组成的简化电路，如图3所示。 R_{DC} 对应磁珠的直流电阻。 C_{PAR} 、 L_{BEAD} 和 R_{AC} 分别表示寄生电容、磁珠电感和与磁珠有关的交流电阻(交流磁芯损耗)。

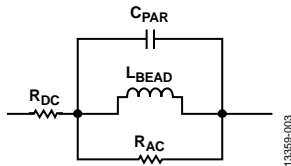


图3. 简化电路模型

某些情况下，图3中的简化电路模型可用来近似计算铁氧体磁珠高达sub-GHz范围的阻抗特性。

本文以Tyco Electronics BMB2A1000LN2多层铁氧体磁珠为例。图4显示了在零直流偏置电流条件下使用阻抗分析仪测得BMB2A1000LN2的ZRX响应。使用的电路仿真器套件是ADIsimPE，它是一款仿真工具，针对模拟和混合信号电路的设计与开发优化。ADIsimPE由SIMetrix/SIMPLIS驱动。

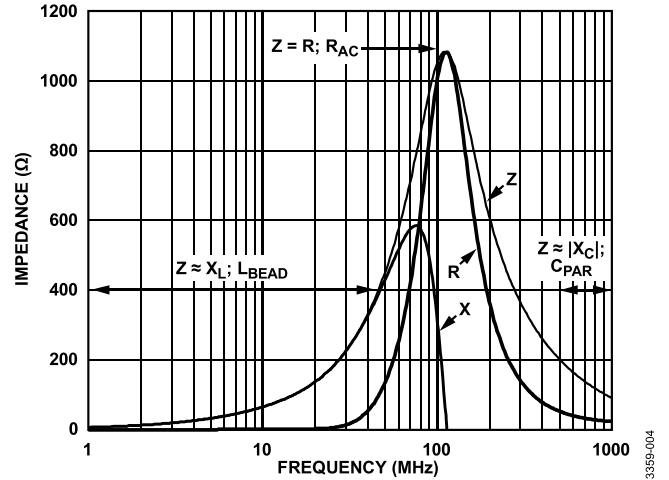


图4. BMB2A1000LN2 ZRX曲线

在测得的ZRX曲线上，磁珠表现出最大感性特性($Z \approx X_L$; L_{BEAD})的区域中，该磁珠的电感可根据下列公式计算：

$$L_{BEAD} = \frac{X_L}{2 \times \pi \times f} \quad (1)$$

其中：

f 是区域内磁珠表现为感性的任意频率点。本例中， $f = 30.7$ MHz。

X_L 是30.7 MHz时的电抗，数值为233 Ω 。

由公式1得出的电感值(L_{BEAD})等于1.208 μ H。

在磁珠表现出最大容性特性($Z \approx |X_C|$; C_{PAR})的区域中，寄生电容可根据下列公式计算：

$$C_{PAR} = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times |X_C|} \quad (2)$$

其中：

f 是区域内磁珠表现为容性的任意频率点。本例中， $f = 803$ MHz。

$|X_C|$ 是803 MHz时的电抗，数值为118.1 Ω 。

由公式2得出的寄生电容值(C_{PAR})等于1.678 pF。

根据制造商的数据手册，直流电阻(R_{DC})等于300 m Ω 。交流电阻(R_{AC})是磁珠表现为纯阻性时的峰值阻抗。从Z中减去 R_{DC} 即可得出 R_{AC} 。由于相比峰值阻抗， R_{DC} 极小，因而可以忽略。因此，本例中 R_{AC} 等于1.082 k Ω 。使用ADIsimPE电路仿真工具生成阻抗与频率响应的关系。图5显示了零直流偏置电流时的阻抗与频率响应的实际测量关系以及仿真测量关系，图6显示了带有计算值的电路仿真模型。本例中，从电路仿真模型得出的阻抗曲线与测量曲线匹配的非常好。

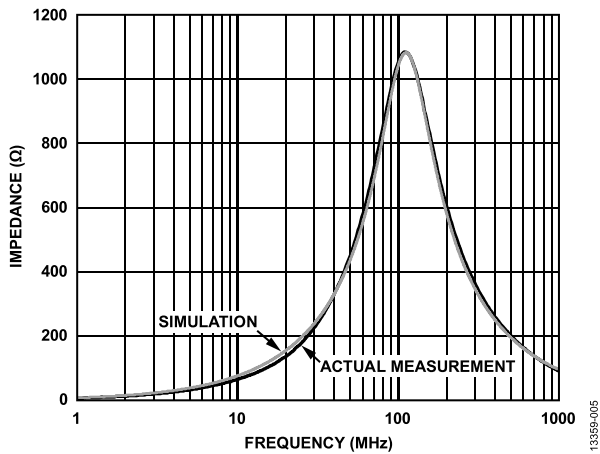


图5. 实际测量曲线与仿真曲线

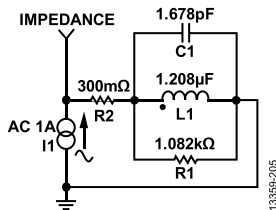


图6. 电路仿真模型

在噪声滤波电路设计和分析中，采用铁氧体磁珠模型很有帮助。例如，当铁氧体磁珠与去耦电容一同组成低通滤波器网络时，对磁珠电感进行近似计算对于获得截止谐振频率很有帮助。然而，本应用笔记中的电路模型是零直流偏置电流情况下的近似。此模型可能随直流偏置电流的变化而改变，而在其他情况下可能需要采用更复杂的模型。

直流偏置电流考虑因素

为电源应用选择正确的铁氧体磁珠不仅需要考虑到滤波器带宽，还需考虑磁珠随直流偏置电流变化而变化的阻抗特性。大部分情况下，制造商仅提供磁珠在100 MHz的阻抗并在数据手册中提供零直流偏置电流时的频率响应曲线(与图2中的相似)。然而，将铁氧体磁珠用作电源滤波时，通过磁珠的负载电流始终不为零，并且随着直流偏置电流从零开始增长，这些参数也会随之迅速改变。

随着直流偏置电流的增加，磁芯材料开始饱和，导致铁氧体磁珠电感大幅下降。电感饱和程度根据组件磁芯所用的材料而有所不同。图7显示了两个铁氧体磁珠的典型直流偏置电感值。额定电流为50%时，电感最多下降到90%。

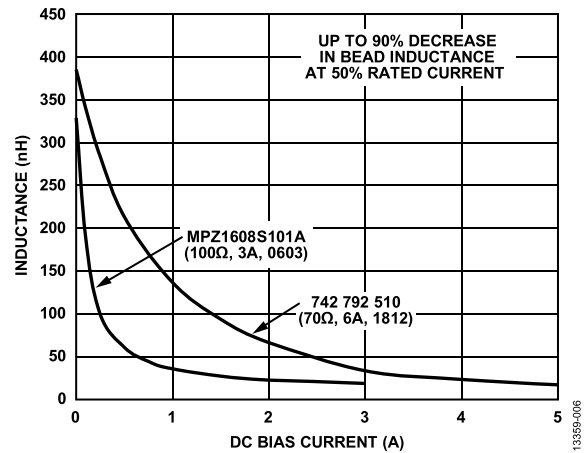


图7. 磁珠电感的直流偏置效应

如需高效过滤电源噪声，应在额定直流电流约20%处使用铁氧体磁珠。如这两个示例所示，在额定电流20%处，电感下降至约30%(6 A磁珠)以及约15%(3 A磁珠)。铁氧体磁珠的电流额定值是器件在指定升温情况下可承受的最大电流值，并非供滤波使用的真实工作点。

此外，直流偏置电流的影响可通过不同频率下阻抗值的减少而观察到，进而降低铁氧体磁珠的有效性和消除EMI的能力。图8和图9显示了铁氧体磁珠阻抗如何随直流偏置电流的变化而改变。

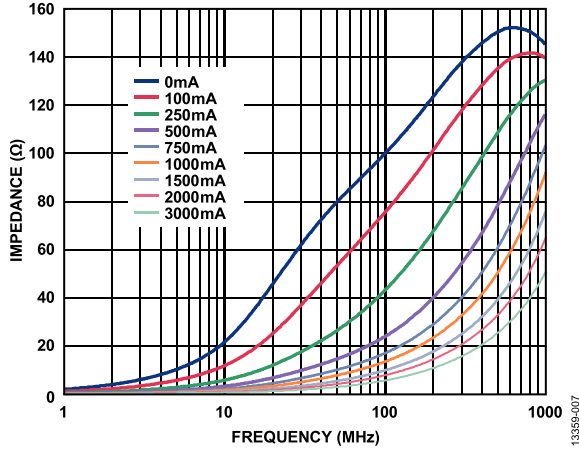


图8. TDK MPZ1608S101A相对于直流偏置电流的阻抗曲线

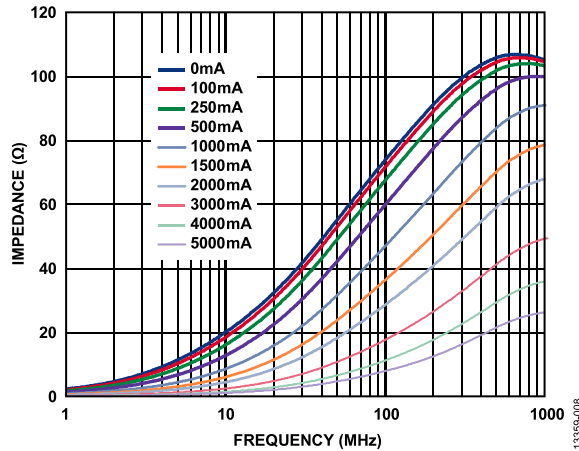


图9. Wurth Elektronik 742 791 510相对于直流偏置电流的阻抗曲线

如图8和图9所示，只需施加额定电流的50%，100 MHz时的有效阻抗就会从100 Ω大幅下降至10 Ω(TDK MPZ1608S101A, 100 Ω, 3 A, 0603)以及从70 Ω下降至15 Ω(Wurth Elektronik 742 792 510, 70 Ω, 6 A, 1812)。

系统设计人员必须充分意识到直流偏置电流对磁珠电感和有效阻抗的影响，因为这对于要求高电源电流的应用可能十分重要。图10显示了100 Ω、3 A额定值的铁氧体磁珠与一个1 μF电容在各种直流偏置电流下的测量衰减，图11显示了测试电路模型。

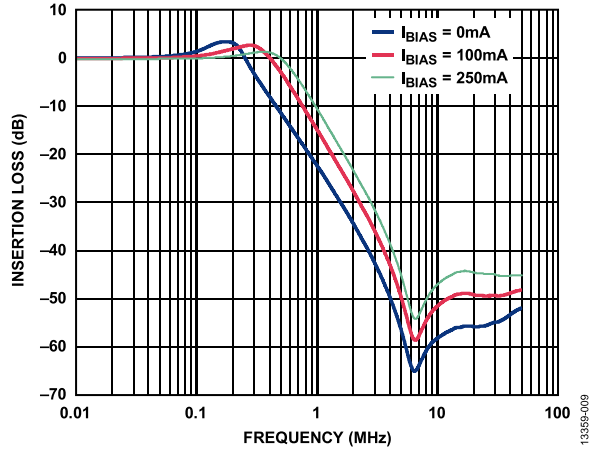


图10. 磁珠和电容低通滤波器在直流偏置电流下的测量响应

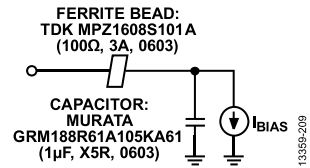


图11. 测试电路模型

对于250 mA偏置电流的3 A磁珠，谐振截止点向右移动，这主要是由图7中描述的电感下降所致。

此外，在1 MHz时(大部分现代开关稳压器的的工作频率)，网络的有效衰减下降多达15 dB。如果系统工程师完全依靠数据手册(只显示零直流偏置电流下的阻抗)，那么这种下降可能会造成问题。因此，为了验证铁氧体磁珠滤波器的有效性并得到准确结果，可对变化直流偏置电流下的电感建模，并在真实工作条件下验证其阻抗特性。

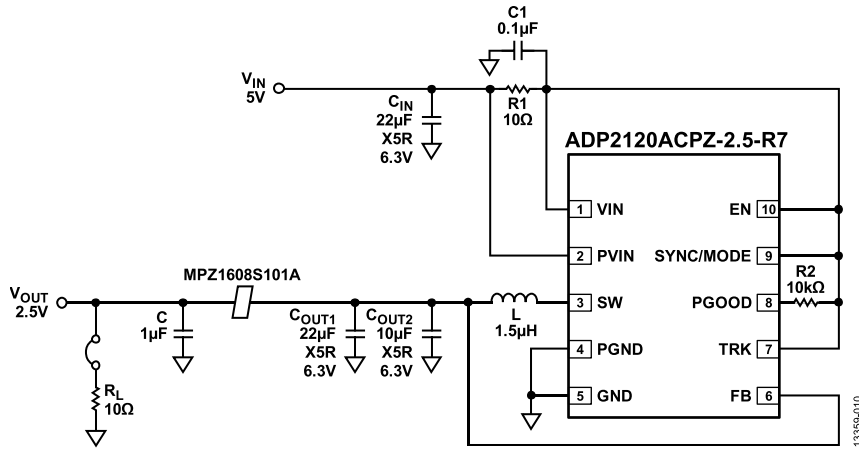


图12. ADP2120应用电路(带磁珠和电容低通滤波器部署的直流偏置效应)

图12显示了采用ADP2120降压稳压器并在强制脉冲宽度调制(FPWM)模式下运行的应用电路,以及铁氧体磁珠滤波器如图11所示。当ADP2120为FPWM模式时,开关噪声频谱输出不会随负载电流的改变而出现大幅变化。有关FPWM模式的更多详情,请参见ADP2120数据手册。频谱输出曲线如图13所示;显示了直流偏置对铁氧体磁珠响应的影响。

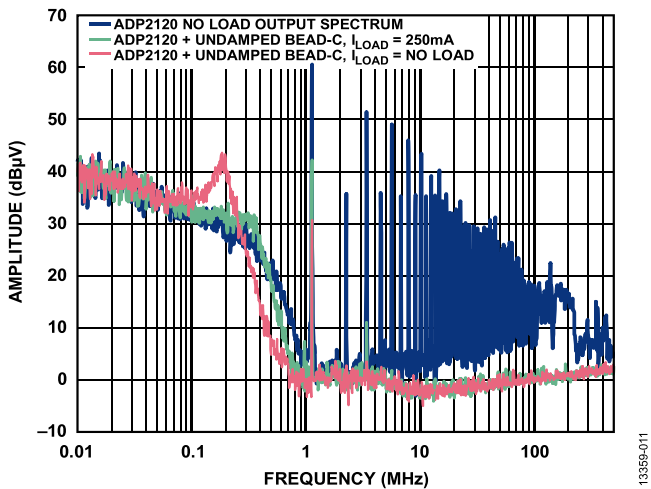


图13. 磁珠和电容低通滤波器在直流偏置电流下的测量响应

随着负载电流如图13所示增加,滤波器截止频率从无负载情况下的大约180 kHz处向右移动到250 mA情况下的大约370 kHz(红色轨迹与蓝色轨迹)。1.2 MHz左右的基频纹波无负载时下降约30 dB,但在250 mA负载时下降至约18 dB。

LC谐振效应

当铁氧体磁珠与去耦电容一同部署时,可能产生谐振尖峰。这个经常被忽视的效应可能会损害性能,因为它可能会放大给定系统的纹波和噪声,而非衰减它们。很多情况下,此尖峰发生在DC-DC转换器的常用开关频率左右。

当低通滤波器网络(由铁氧体磁珠电感和高Q去耦电容组成)的谐振频率低于磁珠的交越频率时,发生尖峰。滤波结果为欠阻尼。图14显示的是TDK MPZ1608S101A测量阻抗与频率的关系曲线。阻性元件(与干扰能量的耗散有关)在约20 MHz到30 MHz以下影响不大。低于此频率则铁氧体磁珠依然具有极高的Q值,且特性接近理想电感。典型铁氧体磁珠滤波器的LC谐振频率一般位于0.1 MHz到10 MHz范围内。对于300 kHz到5 MHz范围内的典型开关频率,需要更大阻尼来降低滤波器Q值。

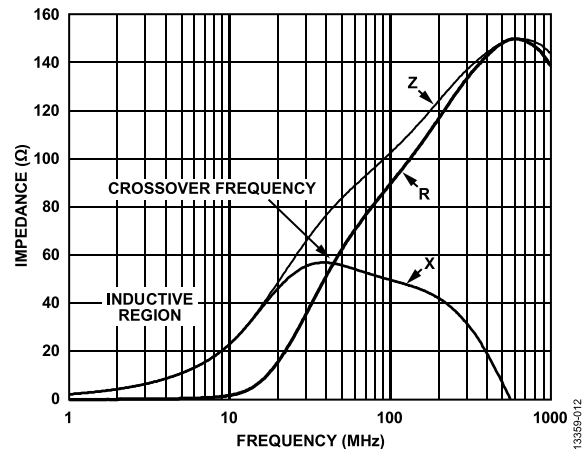


图14. TDK MPZ1608S101A的测量阻抗与频率的关系曲线

图15显示了此效应的一个示例；图中，磁珠和电容低通滤波器的S21频率响应，显示了峰值效应。此例中使用的铁氧体磁珠是TDK MPZ1608S101A(100 Ω, 3 A, 0603)，使用的去耦电容是Murata GRM188R71H103KA01低ESR陶瓷电容(10 nF, X7R, 0603)。负载电流为微安级别。

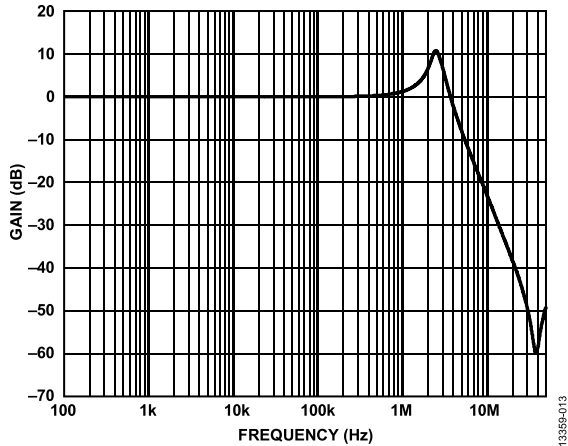


图15. 磁珠和电容低通滤波器的S21响应

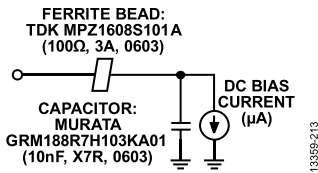


图16. 磁珠和电容低通滤波器测试模型

无阻尼铁氧体磁珠滤波器可能表现出从约10 dB到约15 dB的尖峰，具体取决于滤波器电路Q值。图15中，尖峰出现在2.5 MHz左右，增益高达10 dB。

此外，信号增益在1 MHz到3.5 MHz范围内可见。如果该尖峰出现在开关稳压器的的工作频段内，那么可能会有问题。它会放大开关干扰，严重影响敏感负载的性能，比如锁相环(PLL)、压控振荡器(VCO)和高分辨率模数转换器(ADC)。图15中显示的结果为采用极轻负载(微安级别)，但对于只需要数微安到1 mA负载电流的电路部分或者在某些工作模式下关闭以节省功耗的部分而言，这是一个实用的应用。这个潜在的尖峰在系统中产生了额外的噪声，可能会导致不良串扰。

例如，图17显示了一个ADP5071应用电路，该电路采用了磁珠滤波器；图18显示了正输出端的频谱曲线。开关频率设为2.4 MHz，输入电压设为9 V，输出电压设为16 V，负载电流设为5 mA。

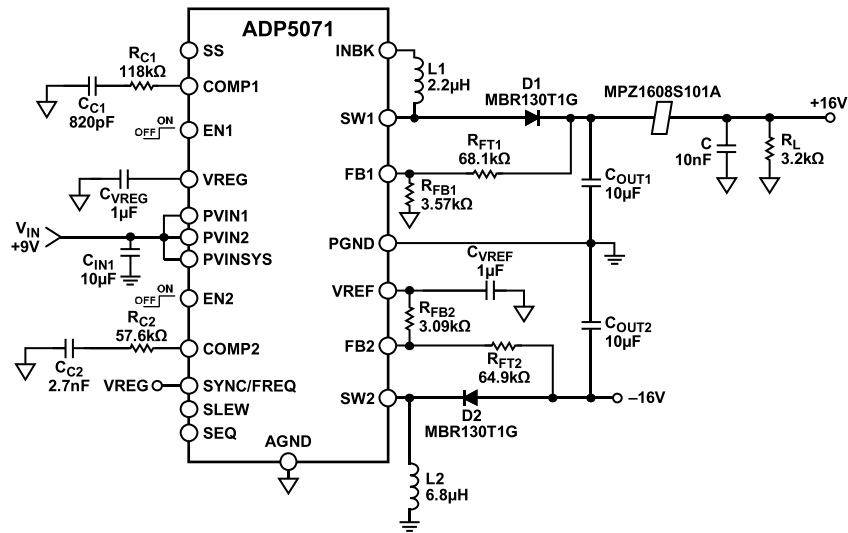


图17. ADP5071应用电路(带磁珠和电容低通滤波器，部署在正输出端)

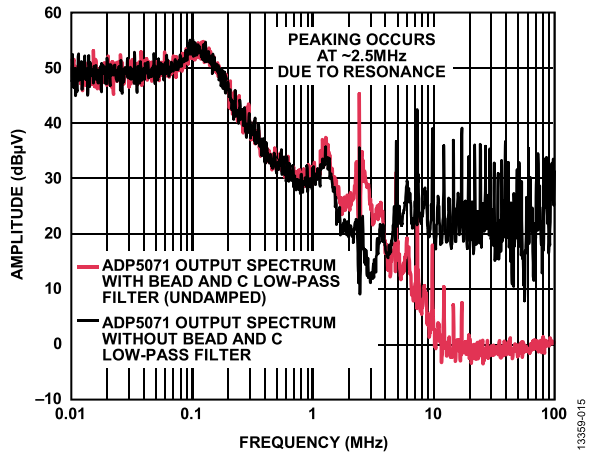


图18. ADP5071 频谱输出(5 mA负载)

由于磁珠的电感和10 nF陶瓷电容，谐振尖峰出现在约2.4 MHz处。出现了10 dB增益，而非衰减基频纹波频率。

影响谐振尖峰的其他因素是铁氧体磁珠滤波器的串联阻抗和负载阻抗。图19显示了10 Ω电阻和0.1 Ω串联源电阻对比的电路仿真结果。可以看到，尖峰大幅降低，并在更高的源电阻下被阻尼衰减。然而，采用这种方法会导致负载调节下降，从而失去实用性。由于串联电阻下降，负载上的直流电压随负载电流而下降。

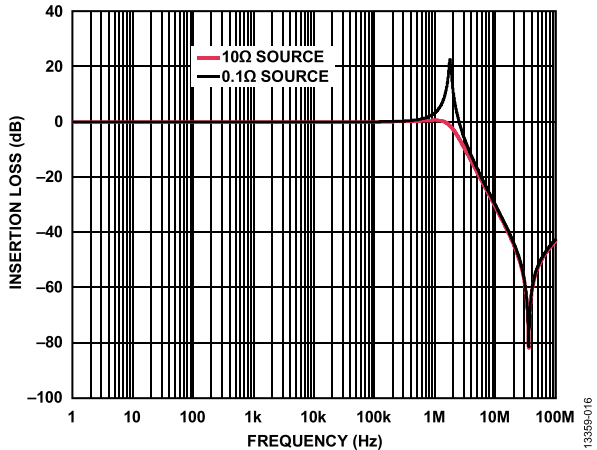


图19. 0.1 Ω源与10 Ω源情况下的电路仿真对比

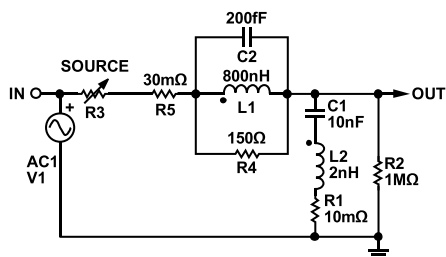


图20. 0.1 Ω源与10 Ω源的电路仿真模型

负载阻抗还会影响峰值响应。轻载条件下的尖峰最严重。

图21显示了从1 MΩ负载变化到10 Ω负载的电路仿真(采用相同的源电阻)。在较低负载电阻下，尖峰受抑制大幅下降。注意，在实际应用中(参见图13)，较高的直流负载电流极大地影响铁氧体磁珠的性能。磁珠的电感随直流电流的增加而下降，影响谐振截止频率。

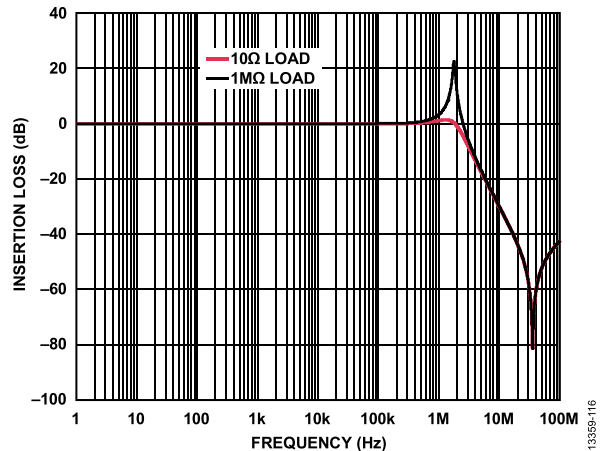


图21. 10 Ω负载和1 MΩ负载下的电路仿真对比

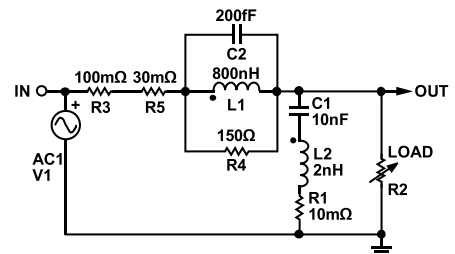


图22. 10 Ω负载和1 MΩ负载下的电路仿真模型

阻尼方法

本节介绍三种阻尼方法，系统工程师可用来大幅降低谐振尖峰电平(见图23)。

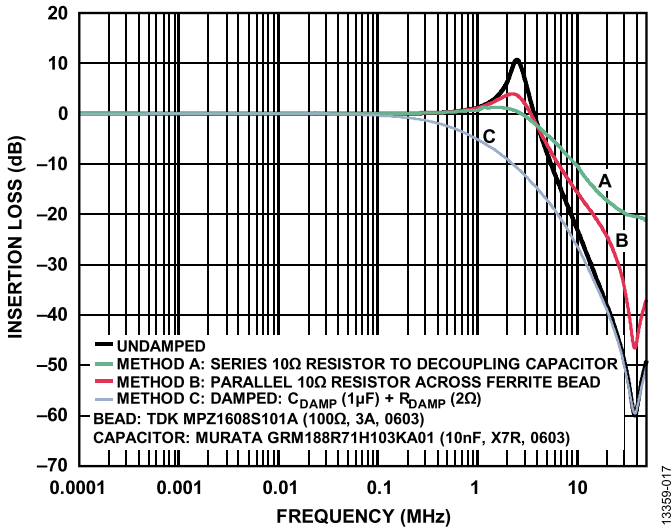


图23. 不同阻尼方法的实际频率响应

方法A是在去耦电容路径上添加一个串联电阻(见图24)，可抑制系统谐振，但会降低高频旁路有效性。

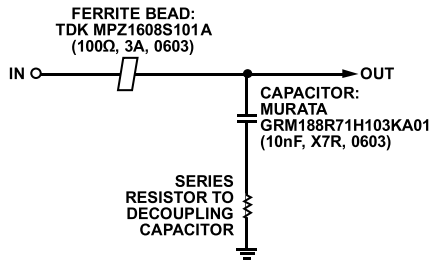


图24. 电阻与去耦电容串联

方法B是在铁氧体磁珠两端并联一个小电阻(见图25)，这样也会抑制系统谐振。但是，在高频时滤波器的衰减特性会下降。图26和图27显示了MPZ1608S101A使用和不使用10Ω并联电阻的情况下阻抗与频率的关系曲线。绿色虚线表示磁珠采用10Ω并联电阻的总阻抗。磁珠和电阻组合的总体阻抗大幅减小，并主要由10Ω电阻决定。但是，采用10Ω并联电阻时的3.8 MHz交越频率远低于磁珠自身在40.3 MHz时的交越频率。在低得多的频率范围内磁珠表现出阻性，可降低Q值，改善阻尼性能。

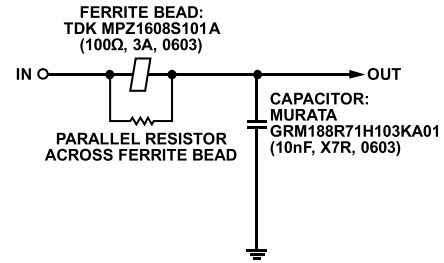


图25. 铁氧体磁珠两端的并联电阻

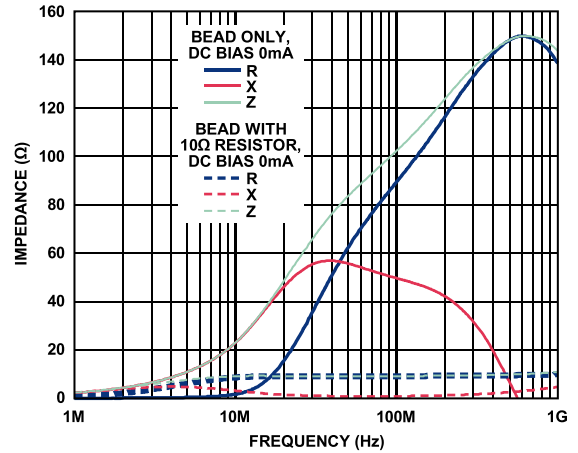


图26. MPZ1608S101A阻抗曲线

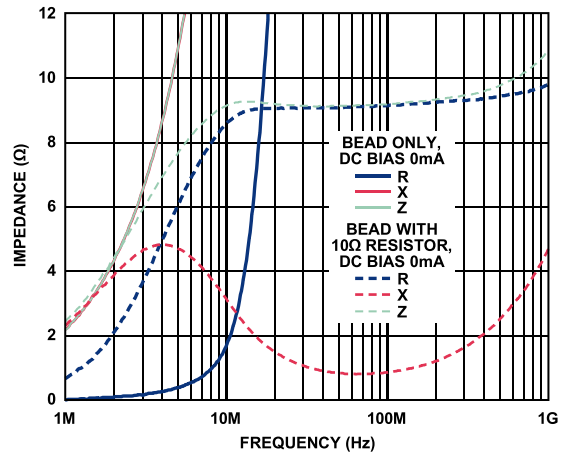


图27. MPZ1608S101A阻抗曲线(缩放视图)

方法C是添加大电容(C_{DAMP})与串联阻尼电阻(R_{DAMP})的组合,通常这种方法最佳(见图28)。

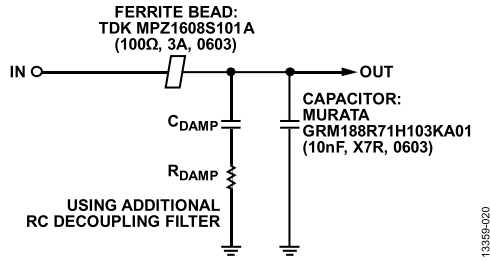


图28. 额外RC去耦滤波器

添加电容和电阻可抑制系统谐振,同时不会降低高频时的旁路有效性,如图23所示。采用此种方法可以避免隔直大电容导致电阻功耗过大。该电容必须远大于所有去耦电容之和,这降低了所需的阻尼电阻值。在谐振频率处,电容阻抗必须远小于阻尼电阻,以便减少尖峰。使用公式3和公式4来确定 R_{DAMP} 范围。设置阻尼电容(C_{DAMP})和去耦电容(C_{DECOUP})比为16倍或更高比率,可提供满足这两个公式的阻尼电阻范围。

$$R_{DAMP} \geq 2 \sqrt{\frac{L_{BEAD}}{C_{DAMP}}} \quad (3)$$

$$R_{DAMP} \leq 0.5 \sqrt{\frac{L_{BEAD}}{C_{DECOUP}}} \quad (4)$$

其中:

R_{DAMP} 是阻尼电阻。

L_{BEAD} 是公式1中的磁珠电感,包括外部电感(比如电路板的寄生走线电感)。

C_{DAMP} 是阻尼电容。

C_{DECOUP} 是去耦电容。

图29显示了ADP5071正输出频谱曲线,其应用电路采用阻尼方法C,如图17所示。 C_{DAMP} 和 R_{DAMP} 分别是1 μ F陶瓷电容和2 Ω SMD电阻。2.4 MHz时的基频纹波降低5 dB增益,而非图18中显示的10 dB增益。

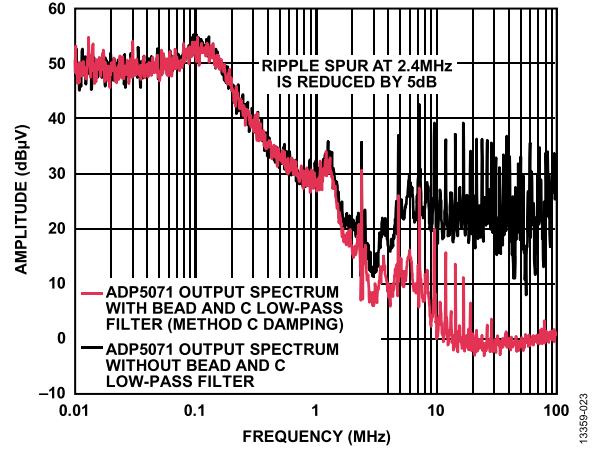


图29. ADP5071 频谱输出加磁珠和电容低通滤波器,采用阻尼方法C

一般而言,方法C最为优雅,通过添加一个电阻和陶瓷电容的串联组合实现,无需购买昂贵的专用阻尼电容。最安全的设计永远包含电阻,可在设计开始时调节,不需要时移除。缺点是额外的元件成本和更多的电路板占位空间。

结论

本应用笔记讨论了使用铁氧体磁珠时必须考虑的关键因素。本应用笔记还详细介绍了一个表示磁珠简单的电路模型。在零直流偏置电流处的仿真结果与实际测量曲线较好的吻合。

本应用笔记还讨论了直流偏置电流对铁氧体磁珠特性的影响。结果表明超过额定电流20%的直流偏置电流可能会导致磁珠电感的大幅下降。这样的电流还会降低磁珠的有效阻抗，削弱EMI滤波能力。在供电轨上以直流偏置电流方式使用铁氧体磁珠时，应确保电流不会导致铁氧体材料饱和以及产生电感的大幅变化。

由于铁氧体磁珠是感性的，将其与高Q值去耦电容一同使用时应当非常谨慎。如果不谨慎，会在电路中产生干扰谐振，弊大于利。但是，本应用笔记中提出的阻尼方法在负载上采用大去耦电容与阻尼电阻的串联组合，从而避免了干扰谐振。正确使用铁氧体磁珠可以高效而廉价地降低高频噪声和开关瞬变。

参考文献

- AN 583应用笔记。为Altera FPGA设计铁氧体磁珠功率隔离滤波器。Altera Corporation, 2009年。
- 数字IC的电源噪声抑制和去耦应用手册, Murata Manufacturing Co., Ltd., 2010年。
- Burket, Chris。铁氧体磁珠生来不同——了解铁氧体磁珠材料特性的重要性。TDK Corporation, 2011年。
- Fancher, David B, ILB、ILBB铁氧体磁珠：电磁干扰和电磁兼容(EMI/EMC)。Vishay Dale, 1999年。
- Hill, Lee和Rick Meadors。Steward EMI抑制技术演示。Steward。
- Kundert, Ken。电源噪声抑制。Designer's Guide Consulting, Inc., 2004年。
- 采用铁氧体解决电磁干扰(EMI), Fair-Rite Products Corp。
- Weir, Steve。铁氧体磁珠的PDN应用。IPBLOX, LLC, 2011年。