

## Application Note

## 降低面向 48V 汽车应用的降压转换器中的传导 EMI



Colin Chen, Nassif Abi Jaoude, Andy Chen, Daniel Li

## 摘要

本应用手册讨论了降压转换器中的一些 EMI (电磁干扰) 挑战, 特别是在电源轨电压高达 48V 直流的汽车系统中。降压转换器具有较高的电压 (dv/dt) 和电流 (di/dt) 变化率, 因此较难满足传导 EMI 合规性标准。本应用手册使用发射模型讨论了降压转换器中传导 EMI 噪声的组成和产生过程。为了解决这些 EMI 相关问题, 我们采用了若干方法和技术来帮助设计人员减轻降压稳压器中的传导 EMI 问题。本文讨论了布局技巧、电感器选择、铁氧体磁珠优化和展频。

## 内容

1 简介.....	2
2 降压转换器的传导发射模型.....	2
3 降低 48V 直流电源轨中降压转换器的传导 EMI.....	5
4 总结.....	11
5 参考资料.....	11

## 插图清单

图 2-1. 由 di/dt 引起的 DM 噪声的传播路径.....	3
图 2-2. 由 di/dt 引起的 DM 噪声的发射模型.....	3
图 2-3. 磁耦合引起的 DM 噪声的传播路径.....	3
图 2-4. 磁耦合引起的 DM 噪声的发射模型.....	3
图 2-5. CM 噪声的传播路径.....	4
图 2-6. CM 噪声发射模型.....	4
图 3-1. 具有 EMI 滤波器和磁珠的降压转换器原理图.....	5
图 3-2. 在 EMI 滤波器前面添加磁珠的影响.....	5
图 3-3. 未使用铁氧体磁珠时的传导 EMI 测试结果.....	6
图 3-4. 使用铁氧体磁珠时的传导 EMI 测试结果.....	6
图 3-5. 顶层布局.....	6
图 3-6. 降压转换器上 CIN 的对称和非对称放置.....	7
图 3-7. 非对称 Cin 放置的传导 EMI 测试结果.....	7
图 3-8. 对称 Cin 放置的传导 EMI 测试结果.....	7
图 3-9. 第二层布局.....	7
图 3-10. 第三层布局.....	8
图 3-11. 底层布局.....	8
图 3-12. 降压转换器中不同尺寸的电感器选择.....	9
图 3-13. 常规电感器的传导 EMI 测试结果.....	9
图 3-14. 小尺寸电感器的传导 EMI 测试结果.....	9
图 3-15. 屏蔽对寄生电容的影响.....	10
图 3-16. 添加了屏蔽的 CM 噪声发射模型.....	10
图 3-17. 金属屏蔽电感器的传导 EMI 结果.....	10
图 3-18. 未采用展频技术时的传导 EMI 结果.....	11
图 3-19. 采用展频技术时的传导 EMI 结果.....	11

## 表格清单

表 1-1. CISPR 25 中的传导发射峰值限值和平均限值.....	2
--------------------------------------	---

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

随着汽车系统中越来越多使用 48V 直流/直流电源轨，降压转换器因具有较高的  $dv/dt$  和  $di/dt$ ，可能导致系统较难满足 EMI 规格要求。表 1-1 展示了 CISPR 25 的传导 EMI 的峰值限值和平均限值，涵盖了 150kHz 至 108MHz 的特定频率范围。

表 1-1. CISPR 25 中的传导发射峰值限值和平均限值

		电平以 dB ( $\mu V$ ) 为单位									
频带	频率 (MHz)	1 级		2 级		3 级		4 级		5 级	
		峰值	平均值	峰值	平均值	峰值	平均值	峰值	平均值	峰值	平均值
广播											
LW	0.15-0.3	110	90	100	80	90	70	80	60	70	50
MW	0.53-1.8	86	66	78	58	70	50	62	42	54	34
SW	5.9-6.2	77	57	71	51	65	45	59	39	53	33
FM	76-108	62	42	56	36	50	30	44	24	38	18
TV 频带 I	41-88	58	48	52	42	46	36	40	30	34	24
移动服务											
CB	26-28	68	48	62	42	56	36	50	30	44	24
VHF	30-54	68	48	62	42	56	36	50	30	44	24
VHF	68-87	62	42	56	36	50	30	44	24	38	18

通常，150kHz 至 30MHz 频率范围内的 EMI 噪声主要由开关频率及其谐波组成。这种类型的噪声可以通过使用 EMI 滤波器来降低。但是，对于 30MHz 至 108MHz 的频率范围（包括 AM 和 FM 收音机），EMI 噪声主要由近场辐射导致。由于寄生电容和电感的影响，EMI 滤波器在该频带中不太有效。因此，需要更多的设计注意事项以满足 EMI 限制，尤其是在 FM 频带。此应用主要针对传导 EMI 并提供了在 LMR38020-Q1 EVM 上实现的提示和技巧。

## 2 降压转换器的传导发射模型

降压转换器的传导发射模型涉及了解差模 (DM) 和共模 (CM) 噪声的来源和传播路径。通过了解这些来源，设计人员可以开发缓解策略，从而降低传导电磁干扰 (EMI) 噪声。

DM 噪声是指在转换器的输入和输出之间流动的噪声。它是由转换器的开关操作导致的，这会导致电压和电流变化。这些变化会生成高频噪声，这些噪声可以通过输入和输出电路传播。降压转换器中 DM 噪声的主要来源是开关晶体管、电感器和输入电容器。

另一方面，CM 噪声是指与转换器的输入和输出并行流动的噪声。这是由转换器布局和寄生电容的不对称引起的。CM 噪声可由转换器的开关操作引起并可通过接地和电力线传播。降压转换器中 CM 噪声的主要来源是输入和输出电路、接地平面和电源布线之间的寄生电容。

### 2.1 DM 噪声发射模型

图 2-1 中显示了一个带有输入 EMI 滤波器 ( $L_f$ 、 $C_f$ ) 的典型降压电路。虚线突出显示了用于测量传导噪声的线路阻抗稳定网络 (LISN)。切换器的输入电流  $i_{Q1}$  是不连续的，导致基波和较低阶谐波以及高频噪声电流。差分噪声是由正电力线和返回电力线之间的相反传播路径引起的，与输入电流的快速  $di/dt$  有关，因此它可以等效于电流源驱动模型，如图 2-2 所示。EMI 滤波器可以减少基波和较低阶谐波，但由于电感器和电容器的寄生参数，它在降低高频 DM 噪声方面的有效性可能会降低。为了降低高频 DM 噪声，封装技术和布局布线技术对于缓解系统中的这些噪声源变得非常重要。

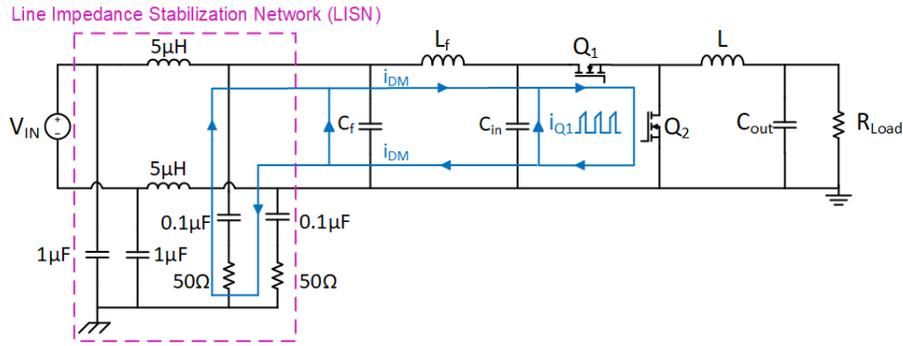


图 2-1. 由 di/dt 引起的 DM 噪声的传播路径

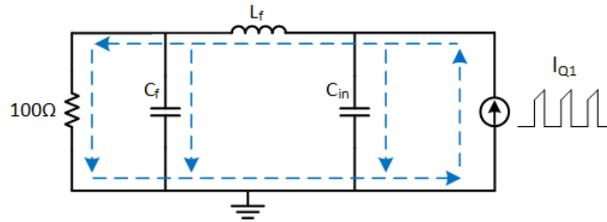


图 2-2. 由 di/dt 引起的 DM 噪声的发射模型

此外，输入电流环路还会产生绕过 EMI 滤波器并耦合到 LISN 的磁场，如图 2-3 中所示。这种磁耦合被建模为互感 ( $M_1$ )。功率电感器的泄漏磁场也通过互感 ( $M_2$ ) 耦合到 LISN 网络。其发射模型可以等效于图 2-4。两种类型的磁耦合都会产生 DM 噪声电流。为了解决这些问题，通过策略性地放置输入电容器来减少磁耦合 ( $M_1$ )，从而更最大限度地减少降压转换器的输入电流环路至关重要，使用完全密封的电感器来减少磁耦合 ( $M_2$ ) 也是有益的。

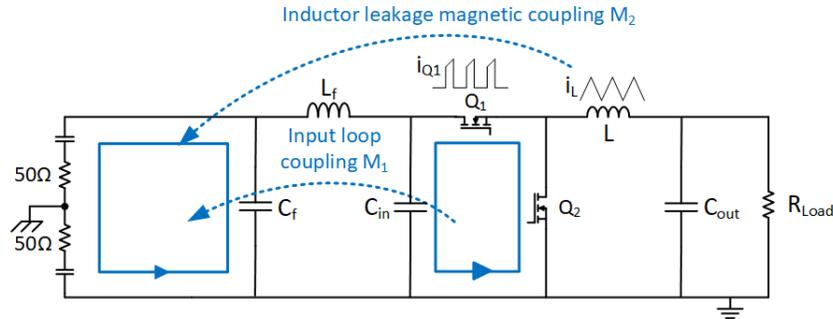


图 2-3. 磁耦合引起的 DM 噪声的传播路径

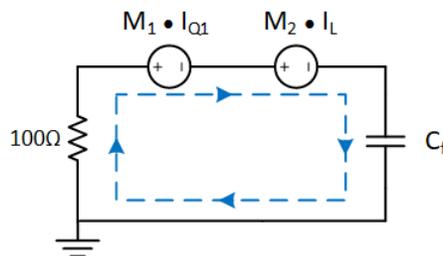


图 2-4. 磁耦合引起的 DM 噪声的发射模型

## 2.2 CM 噪声发射模型

除了导致 DM 噪声电流的高 di/dt 之外，SW 节点上的高 dv/dt 还可以通过寄生电容 CP 将位移电流耦合到接地端。此耦合噪声电流随后由同方向的电力线和 GND 线返回，从而产生 CM 噪声。

图 2-5 显示了 CM 噪声的传播路径。可以观测到，EMI 滤波器 ( $L_f$  和  $C_f$ ) 不会有效地阻碍 CM 噪声的传播，除非在输入线上添加共模扼流圈 ( $L_{CM}$ )。但是，这种解决方案会增加系统成本和解决方案尺寸，在某些应用中可能不可行。

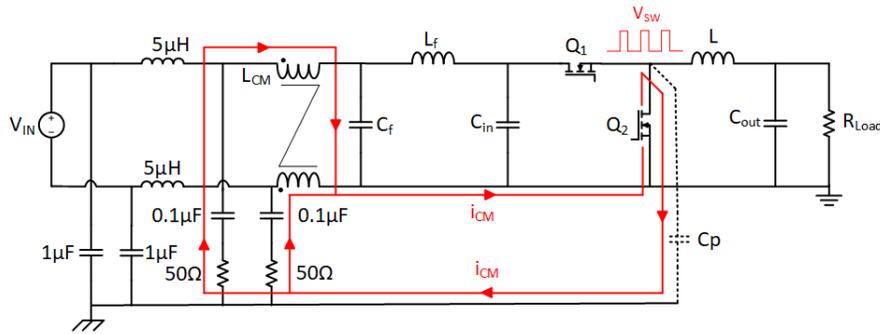


图 2-5. CM 噪声的传播路径

CM 噪声受  $dv/dt$  和  $C_p$  的影响。它可以表示为电压源驱动模型，如图 2-6 所示。通过添加带有  $C_{boot}$  的串联  $R_{boot}$  以降低  $dv/dt$  压摆率，或通过尽可能减小 SW 节点面积来降低  $C_p$ ，可以减少噪声源。

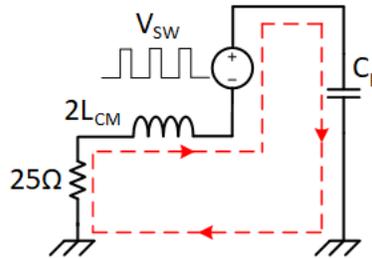


图 2-6. CM 噪声发射模型

### 3 降低 48V 直流电源轨中降压转换器的传导 EMI

节 2 展示了降压转换器的差模 (DM) 噪声和共模 (CM) 噪声的传播路径和发射模型。了解这些因素后，可以通过更最大限度地减少噪声源和干扰传播路径来解决 EMI 问题。EMI 测试遵循 CISPR 25 5 类标准。本研究使用了 LMR38020-Q1，它是一款 80V、2A 同步降压转换器。转换器的原理图如图 3-1 所示。测试条件包括  $V_{in}=48V$ 、 $V_{out}=5V$ 、 $I_{out}=2A$  和  $F_{sw}=400kHz$ ，这是汽车设置中直流/直流电源系统的典型参数。

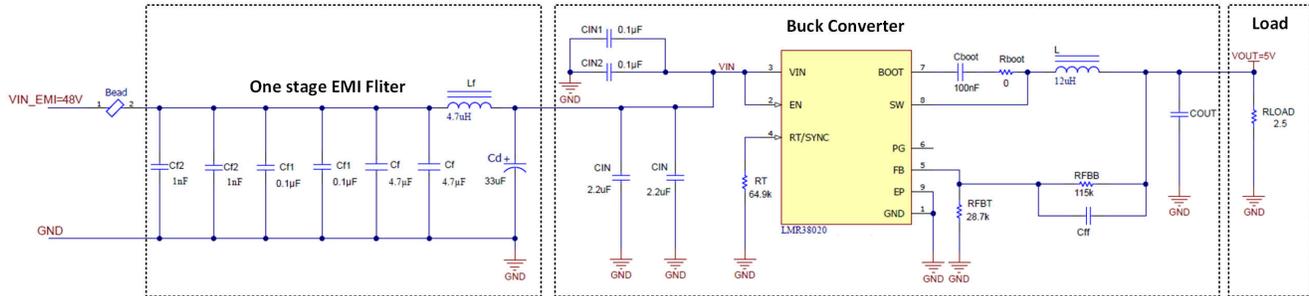


图 3-1. 具有 EMI 滤波器和磁珠的降压转换器原理图

#### 3.1 磁珠注意事项

很明显，在转换器前面增加一个单级 EMI 滤波器能够有效地减少开关频率及其谐波处的 DM 噪声。但在某些情况下，可能需要一个两级滤波器来实现 DM 噪声的更大衰减。为了保持低成本、高功率密度解决方案，此设计中未使用输入扼流圈。

此外，图 3-2 显示了在 EMI 滤波器前面包含具有更高自谐振频率 (SRF) 的磁珠。这有助于增加高频下的输入阻抗，从而抑制由输入电流尖峰和磁耦合引起的 DM 噪声。

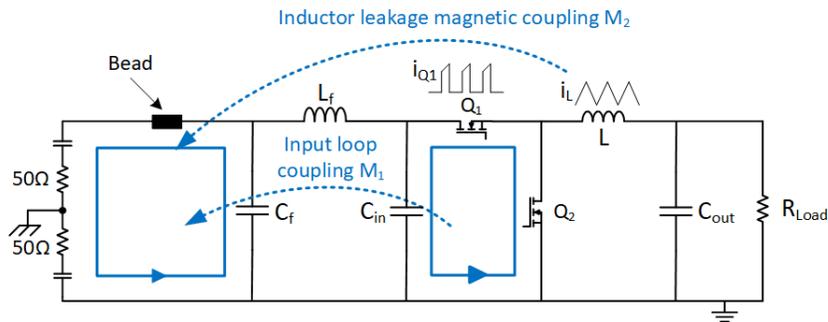


图 3-2. 在 EMI 滤波器前面添加磁珠的影响

图 3-3 和图 3-4 显示了使用和不使用铁氧体磁珠时的 EMI 测试结果。数据表明，加入磁珠可显著降低噪声水平，尤其是在 10MHz 至 70MHz 范围内，使用磁珠后峰值噪声大约降低 8db，平均噪声降低 10db。这些结果证明了磁珠在降低高频范围内的噪声方面的有效性。

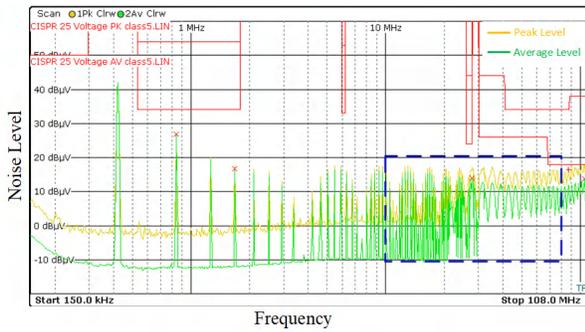


图 3-3. 未使用铁氧体磁珠时的传导 EMI 测试结果

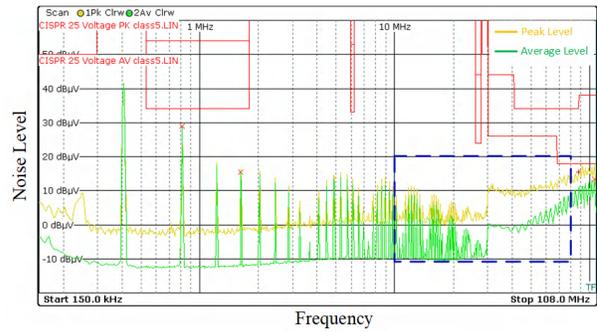


图 3-4. 使用铁氧体磁珠时的传导 EMI 测试结果

### 3.2 布局注意事项

布局布线在更大限度地降低 EMI 噪声方面发挥着至关重要的作用，如果可能，建议使用四层 PCB。顶层应主要容纳转换器、电感器和 SW 节点，所有这些都是噪声源。第二层应为连续的覆铜，用作接地平面以提供屏蔽。第三层可用于布放输入、输出和信号布线。最后，底层应容纳远离顶层噪声源位置的 EMI 滤波器。

下面概述了同步降压转换器 LMR38020-Q1 的建议布局，其中包含重要注意事项：

1. 顶层注意事项，如图 3-5 所示。

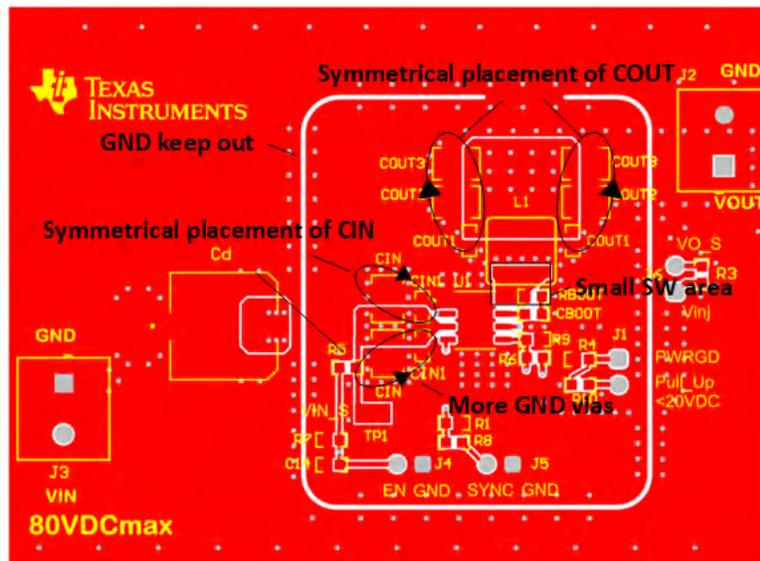
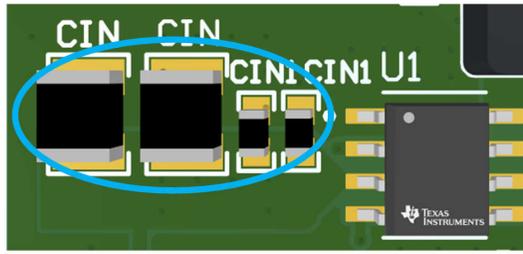


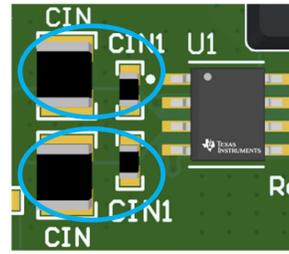
图 3-5. 顶层布局

- 输入电容器 (Cin) 应靠近 VIN 和 GND 引脚放置，以更大限度地减小输入关键型环路面积。此外，应在 Cin 的 GND 和 VIN 平面周围放置更多过孔，以减小输入电流环路的寄生电感。此外，应对称地放置 Cin 以创建两个输入环路，从而消除感应的磁场并减弱与 LISN 的磁耦合。相似地，输出电容器也应该对称放置以实现同样的效果。
- SW 节点是主要噪声源，在布线时应避免连接到其他层的任何过孔。此外，SW 节点面积应保持较小，从而更大限度地减小寄生电容 (CP)。
- 建议添加一个 GND 禁止区域，将外部 GND 与内部 GND 噪声隔离。

图 3-6 展示了 Cin 在非对称和对称配置中的放置方式。图 3-7 和图 3-8 显示了两种配置之间 EMI 测试结果的比较。数据表明，在 FM 频段中，与非对称配置相比，对称电容器放置的峰值和平均噪声水平大约低 4dB。这一发现证明了通过采用对称放置电容器来消除磁场的优势。



Non-symmetrical placement of Cin



Symmetrical placement of Cin

图 3-6. 降压转换器上 CIN 的对称和非对称放置

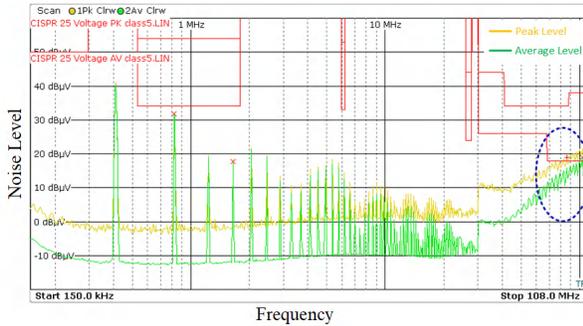


图 3-7. 非对称 Cin 放置的传导 EMI 测试结果

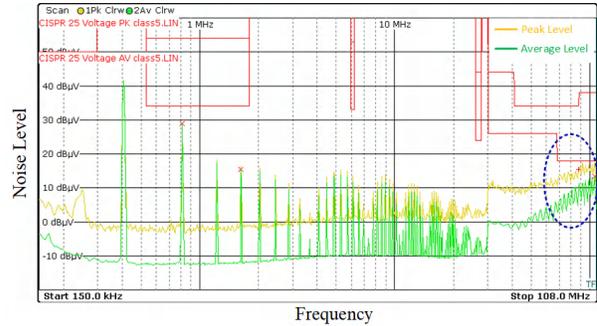


图 3-8. 对称 Cin 放置的传导 EMI 测试结果

- 图 3-9 演示了第二层布局注意事项。在该布局中，整个第二层填充有铜作为接地平面。该接地平面位于输入关键环路和电感器的正下方。这样，铜中会产生涡流，这有助于减弱元件之间的磁耦合并降低整体 EMI 噪声。

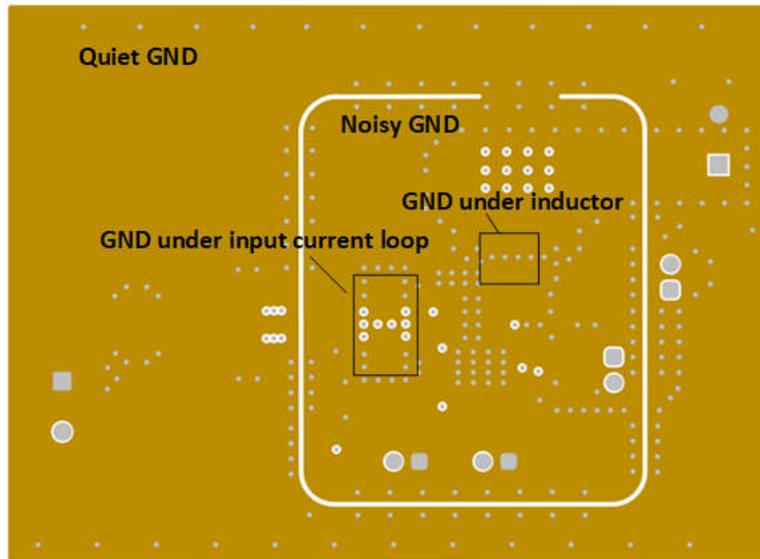


图 3-9. 第二层布局

- 第三层如图 3-10 所示，该层主要用于信号布线。电源正常和 EN UVLO 等信号可以在该平面上布线。

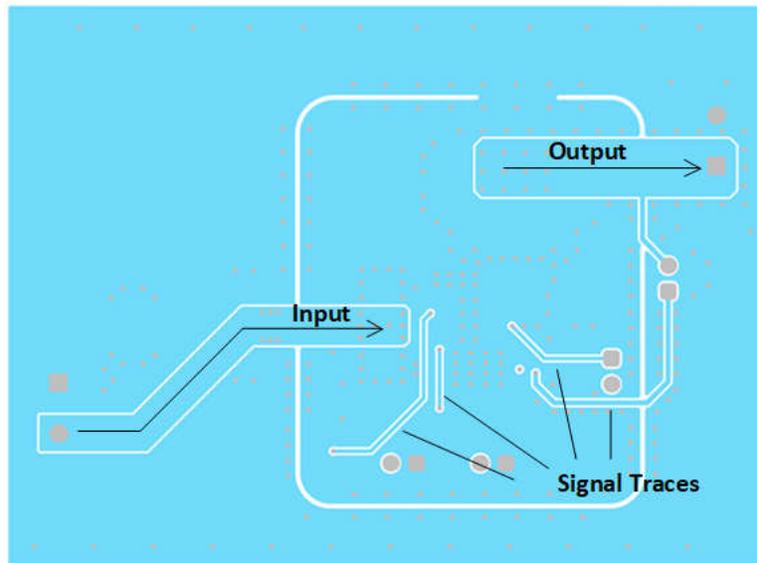


图 3-10. 第三层布局

3. 图 3-11 展示了底层。EMI 滤波器放置在这一层，远离先前讨论过的顶层噪声源。请注意，滤波电容器也是对称放置的，以进一步减少任何磁耦合。

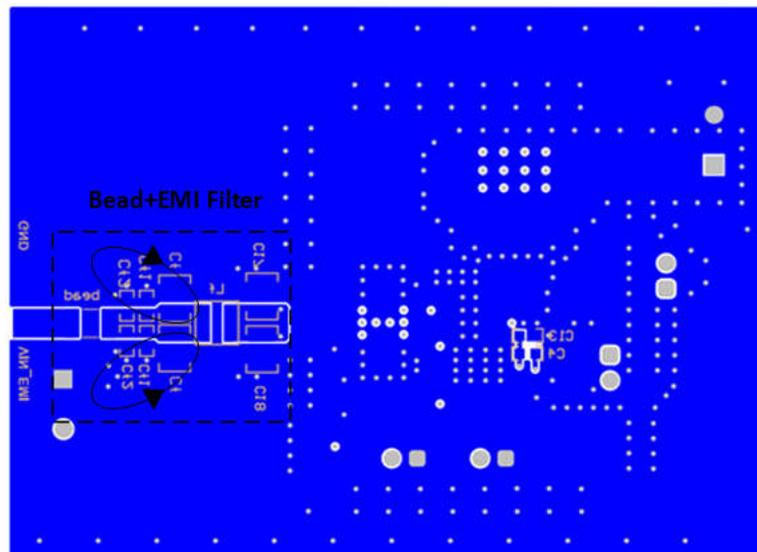


图 3-11. 底层布局

### 3.3 功率电感器注意事项

在选择功率电感器时，必须考虑 SW 节点通过接地寄生电容引起的电气耦合。这些近场耦合会导致高频 EMI 噪声。

为了缓解这种噪声，建议使用端接位于封装下方的电感器。此配置有助于更大限度地减少磁耦合。此外，电感器的尺寸需要尽可能小，同时仍然满足  $I_{sat}$  和  $I_{rms}$  的要求。这种较小的尺寸有助于更大限度地减少电气耦合。

图 3-12 展示了同一电路板上两种不同尺寸的电感器。在图 3-13 和图 3-14 中比较了 EMI 测试结果，表明小尺寸电感器的噪声水平比 FM 频带中正常尺寸电感器的噪声水平低 5dB。这证明了使用较小尺寸的电感器在降低 EMI 噪声方面的有效性。

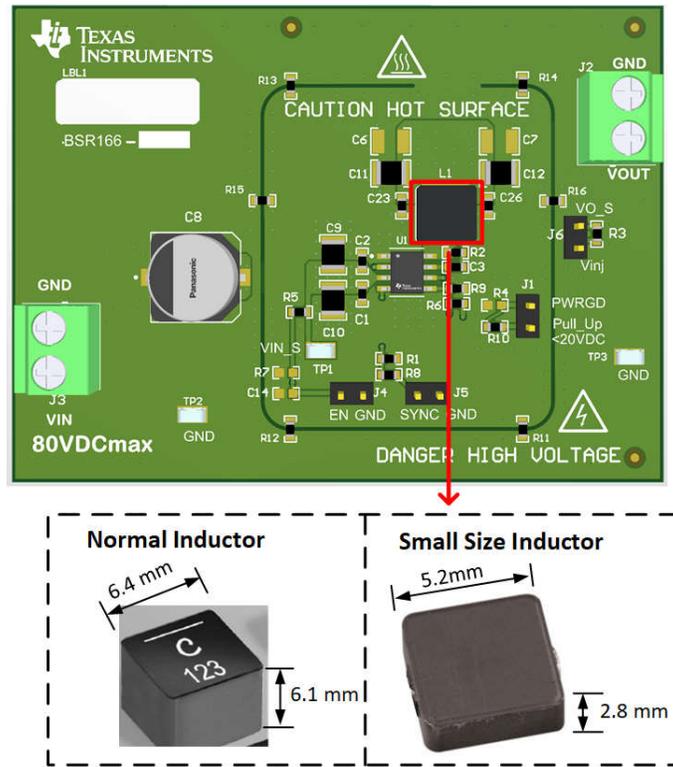


图 3-12. 降压转换器中不同尺寸的电感器选择

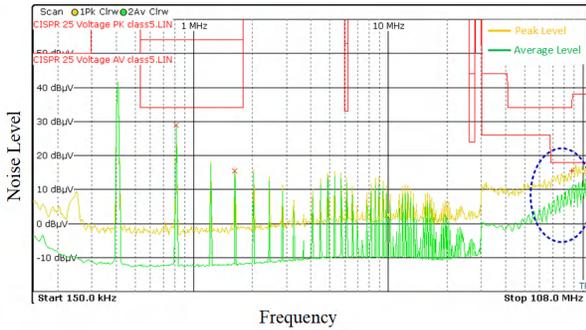


图 3-13. 常规电感器的传导 EMI 测试结果

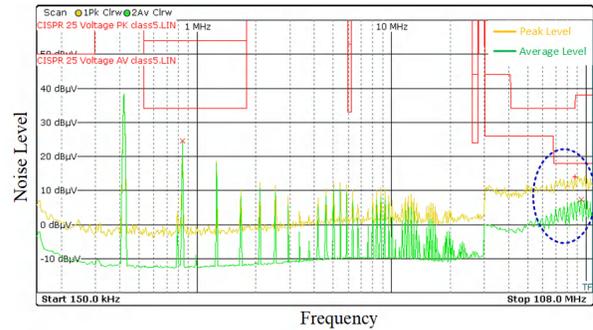


图 3-14. 小尺寸电感器的传导 EMI 测试结果

添加屏蔽层是降低 EMI 噪声的常用方法。屏蔽层需要连接到 PCB 接地端以有效降低噪声。图 3-15 说明了添加屏蔽层的影响。SW 节点和接地之间的寄生电容  $C_p$  由两个电容替代： $C_{p1}$  表示 SW 节点和 PCB 接地端之间的电容， $C_{p2}$  表示 PCB 接地端和整体接地端之间的电容。如图 3-16 中所示，当添加屏蔽层后，CM 噪声发射模型也会发生变化。CM 噪声现在在  $C_{p1}$  和 PCB 接地之间流动，而不是流入机箱（系统）接地。噪声流的这种变化会使 LISN 无法检测到噪声。

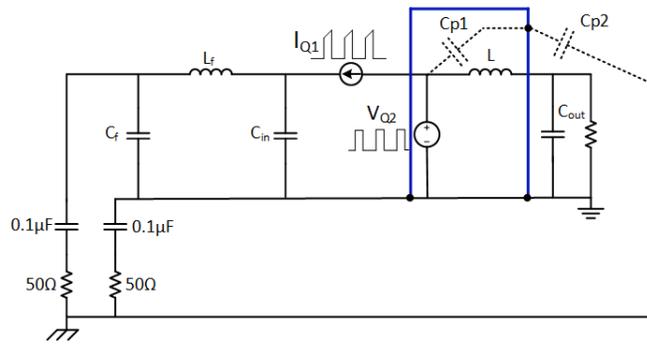


图 3-15. 屏蔽对寄生电容的影响

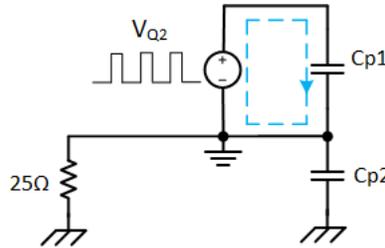


图 3-16. 添加了屏蔽的 CM 噪声发射模型

传统屏蔽通常很笨重且散热性能很差。为了克服这些限制，选择带有金属屏蔽的电感器可能是更好的做法。图 3-17 显示了使用金属屏蔽电感器的测试结果。可以观察到，与图 3-13 中显示的正常电感器噪声相比，使用金属屏蔽电感器时，FM 频带中的 EMI 噪声降低了大约 10dB。这证明了使用金属屏蔽电感器在降低 EMI 噪声方面的有效性。

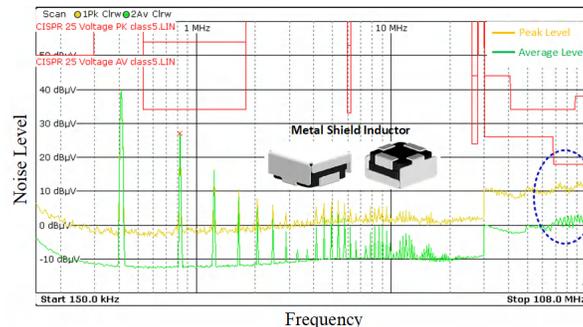


图 3-17. 金属屏蔽电感器的传导 EMI 结果

### 3.4 展频

展频是一种将 EMI 源信号转换为宽带信号的技术。这种能量在多个频率上的传播有助于减小噪声振幅，从而改善整体 EMI 性能。

图 3-18 和图 3-19 展示了采用展频技术和未采用展频技术的 LMR38020Q 的 EMI 结果。可以观察到，展频版本在开关频率及其谐波下的噪声水平降低了 5dB，在 FM 频带下降低了 10dB。这证明了展频的实施可以显著提高汽车 48V 直流系统中的 EMI 性能。

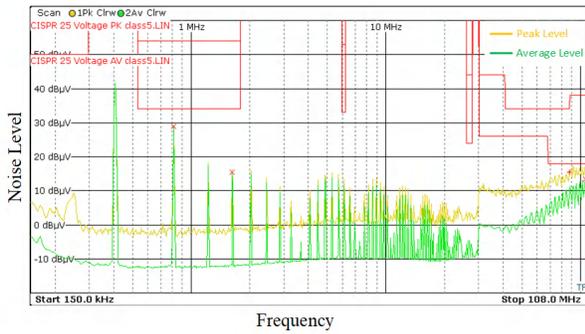


图 3-18. 未采用展频技术时的传导 EMI 结果

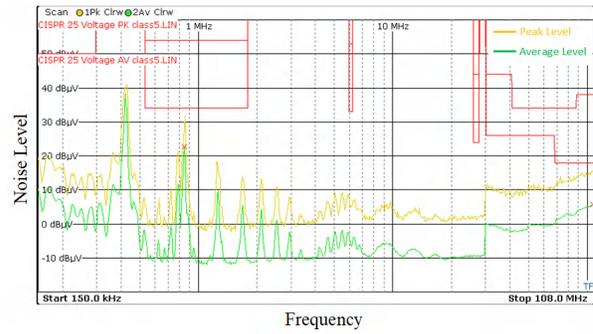


图 3-19. 采用展频技术时的传导 EMI 结果

## 4 总结

本应用手册提供了有关如何降低在 48V 汽车系统中运行的降压转换器中的传导 EMI 噪声的指导。此处讨论的主要方法包括 EMI 滤波器注意事项、布局优化、电感器选择和展频技术的使用。这些方法能够有效地降低 EMI 噪声，尤其是在汽车应用中常见的具有挑战性的 FM 频带频率范围内。通过遵循这些建议，设计人员可以在其降压转换器设计中实现更高的 EMI 性能。

## 5 参考资料

- 德州仪器 (TI), [TPS560430-Q1 4V 至 36V、600mA 同步降压转换器](#) 数据表。
- CISPR, CISPR 25:2016, fourth edition (or EN 55025:2017), [Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers](#), October 27, 2016.
- 德州仪器 (TI), [减少传导 EMI 的方式比您想象的要多](#) 博客
- 德州仪器 (TI), [汽车 EMI 降低技术、应用和解决方案](#) 培训视频
- 德州仪器 (TI), [直流/直流转换器中 EMI 和噪声消减认知](#) 培训视频
- 德州仪器 (TI), [轻松抑制直流/直流转换器的传导 EMI](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [使用 LM4360x 与 LM4600x 简化低辐射 EMI 布局](#) 应用手册。
- Ott, Henry W. *Electromagnetic compatibility engineering*. John Wiley & Sons, 2011.
- 德州仪器 (TI), [降低汽车降压转换器应用中的传导 EMI](#) 应用手册。

## 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