

DCDC 转换器的输入滤波器

降低 DC/DC 转换器传导噪声的输入滤波器的设计和应用注意事项

前言

DC/DC 转换器通过电源线进行传导噪声的传播。很多 DC/DC 转换器 IC 带有扩频功能，可以减小噪声滤波器的器件尺寸和降低 BOM 成本。为了将传导噪声水平降低到可以接收的水平，需要使用输入滤波器。本应用手册就 DC/DC 转换器的输入滤波器的设计和注意事项进行了说明。

产生传导噪声的原因

DC/DC 转换器的输入电流会根据 DC/DC 转换器的开关频率进行周期性的变化。在输入电容器的等效串联电阻 (ESR) 上，由于交流的输入电流会产生纹波电压。该纹波电压的振幅，本质上取决于所使用电容器的 ESR。

电解电容和高分子电容的 ESR 范围从几个毫欧姆到几个欧姆，相对来说阻值较大。因此，当使用上述种类的电容器时，纹波电压的振幅也会变大。与此相对的，多层陶瓷电容 (MLCC) 的 ESR 只有几个毫欧姆，非常得小，因此纹波电压也只有几个 mV。

可以使用示波器的时域分析功能，对 DC/DC 转换器的输入 AC 波形进行分析。

这样，在 DC/DC 转换器的设计阶段，能够比较容易地实现干扰频谱的测量，给传导噪声/EMC 问题提供了一个简单的评估方法。

图 1 是开关频率为 2.2MHz 的车载 DC/DC 转换器 BD9Pxx5xx 系列的输入纹波电压的示例波形。

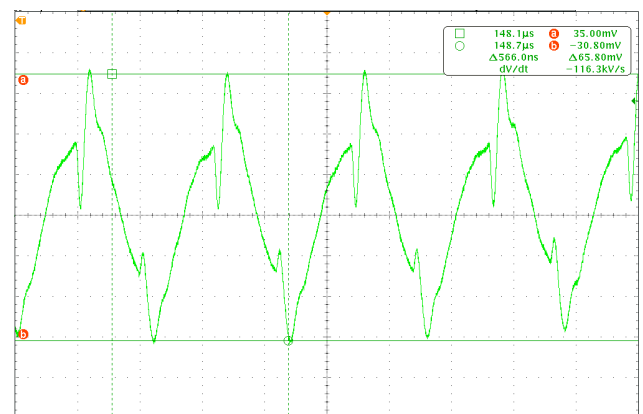


图 1: DC/DC 转换器的输入电容器的纹波电压

本例中的工作条件是 12V DC 电压输入、5V DC 电压输出、阻性负载 1A。

在本例中，DC/DC 转换器的输入电容器使用的是 MLCC。此时，虽然 MLCC 有较低的 ESR，输入纹波电压还是达到了 68mV。由于该纹波电压的影响，产生了差模噪声，在 DC/DC 转换器的输入端产生了传导噪声。（参考图 2）。

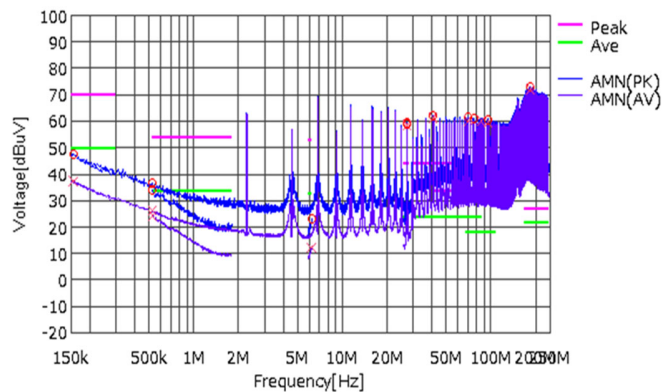


图 2：不使用输入滤波器时 DC/DC 转换器的传导噪声

图 2 是基于汽车 CISPR25 标准，在 150 kHz ~ 300 MHz 频段进行传导噪声测试的结果。此时，因为没有使用扩频功能，DC/DC 转换器工作在恒定 PWM 模式。从测试结果可以确认在与 DC/DC 转换器开关频率 2.2MHz 相同的频段，有 65 dBuV 的峰值基波噪声。其他高次谐波噪声的峰值，也超过了噪声允许限值的 20 dBuV。

减小传导噪声

为了通过电磁兼容性（EMC）测试，减小 DC/DC 转换器的传导噪声，需要使用输入滤波器。图 3 是具有上述输入滤波器的 DC/DC 转换器的传导噪声被抑制的结果。

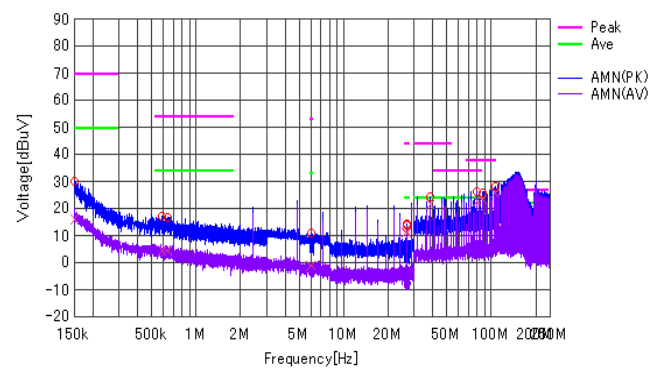


图 3：使用输入滤波器时 DC/DC 转换器的传导噪声

工作条件和上述一样，没有使用扩频功能，DC/DC 转换器工作在恒定 PWM 模式。

平均噪声（AV）和峰值噪声（PK）的噪声水平，在全频段内都有所降低，在允许限值范围以内。

输入滤波器的主要目的，是抑制从前段电源传导过来的噪声和浪涌，以及减少开关频率及其高次谐波频率所产生的干扰信号，防止对与该电源相连接的其他器件产生不良影响。

一般来说，会使用如图 4 所示的 π 型输入滤波器，对输入电流进行滤波。这样可以减小 AC 电压纹波的振幅，将传导噪声抑制到可接受的较低的水平。

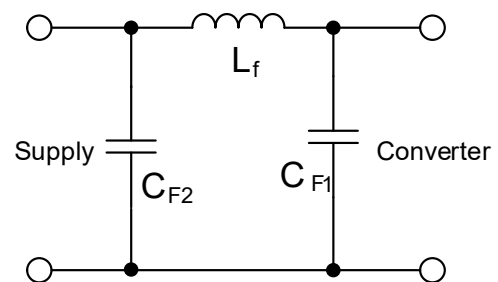


图 4： π 型输入滤波器

输入滤波器的设计

输入滤波器设计的第一步，是将用于减小 AC 振幅的电容器连接到 DC/DC 转换器 IC 的输入端。此电容器的作用是高通滤波器旁路电容。后续称该电容为 C_{F1} 。

此时，该输入电容器可以选择使用 MLCC。MLCC 的 ESR 非常小可以忽略，因此高频电压可以通过低阻抗接地而很快被短路泄放掉。AC 纹波的频率相同。旁路滤波电容的容值，需要选择为使得电容器自身谐振频率和 DC/DC 转换器 IC 的开关频率相近。

图 5 所示是封装大小为 EIA1206 的 4.7 μF MLCC 的阻抗曲线和 ESR 曲线。

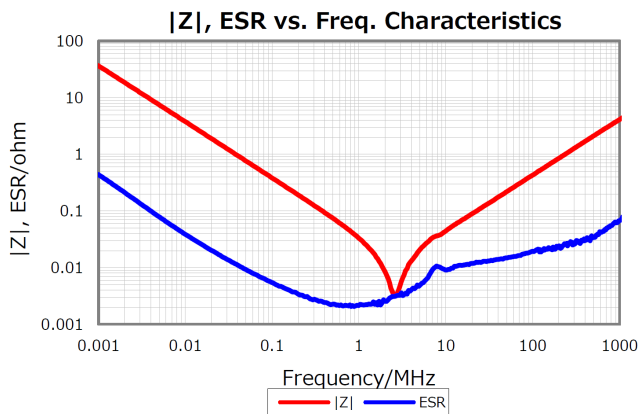


图 5: 4.7 μF MLCC 的 ESR 特性

MLCC 的阻抗特性是在自身谐振频率 (SRF) 处，ESR 为最小。为了将 AC 噪声通过低阻抗接地，需要选择低 ESR 的 MLCC。

当使用开关频率工作在 2.2MHz 的 BD9Pxx5xx 等 DC/DC 转换器 IC 时，如图 5 所示，推荐使用 EIA0805 封装大小的 4.7 μF MLCC 作为旁路滤波电容。

之后，再配置滤波电感 (后续称作 L_F) 和滤波电容 C_{F2} ，就可以形成 LC 滤波器。LC 滤波器输入端的噪声经过 LC 滤波器后在其输出端，可以得到 40 dB/decade 的削减。

为了减小 DC/DC 转换器所产生的噪声，需要将 LC 滤波器的截止频率按照开关频率的 1/10 进行最优化设置。截止频率 f_{cf} 的计算公式如式 (1) 所示。

$$(1) \quad f_{cf} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_F \cdot C_{F2}}}$$

滤波电感通常是输入滤波器中最贵的元件。为了降低 BOM 成本，可以选择 10 μH 等低感量的电感。为了通过使用滤波电感来实现较高的噪声衰减能力，推荐滤波电感的感量小于滤波电容的静电容量。

感量越大，SRF 越小。例如选择自身谐振频率大约是 30 MHz 的电感，实际设计时一般选择最大感量小于 10 μH 的滤波电感。

60~400 KHz 的低开关频率范围，适合使用金属复合型电感。对于 1MHz 以上的较高开关频率，推荐使用铁氧体型电感。

当实际电流超过滤波电感的额定电流时，可能会对电感线圈造成损害。为了不对 DC/DC 转换器的效率产生影响，推荐使用等效串联电阻 (RDC) 较小的电感。

DC/DC 转换器的有效输入电流 I_{in} 的计算公式如式 (2)。

$$(2) \quad I_{in} = \frac{V_{out} \cdot I_{out}}{V_{in} \cdot \eta}$$

滤波电感的额定电流必须大于输入电流。滤波电容 C_{F2} 可以由公式 (3) 进行计算。

$$(3) \quad C_{F2} = \frac{1}{(2\pi \cdot 0.1 \cdot f_{sw})^2 \cdot L_f}$$

根据成本和用途, 滤波电容 C_{F2} 既可以选择使用 MLCC 也可以选择使用电解电容。此处电解电容具有 ESR 较大的优点, 适合用来衰减电源线的暂态电压。MLCC 比电解电容便宜, 但是其静电容量会随着电压升高而减小。

例如, 图 6 是 150nF、额定 50V、X7R MLCC 的电压偏置特性。

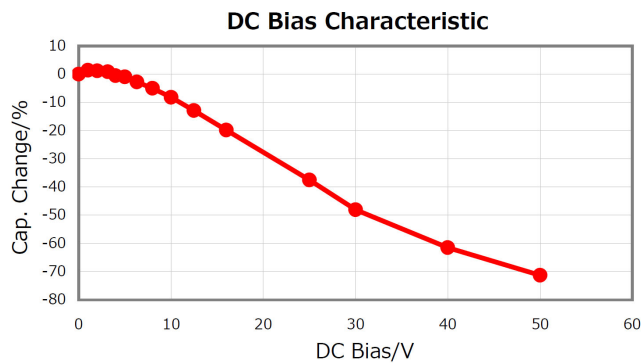


图 6: 150nF、额定 50V、X7R MLCC 的电压偏置特性

关于 MLCC 的电压偏置特性, 需要保证所选用的 MLCC 在实际施加的电压条件下有必要的静电容量。一般选型时要求电容器的额定电压大于电容器上实际所产生最高电压的 2 倍。

滤波器阻尼

输入滤波器会对 DC/DC 转换器的传递函数产生影响, 从而导致环路增益产生变化, 这对于 DC/DC 转换器的控制环路稳定性来说是非常重要的因素。也就是说, 在特定的条件下, 当追加输入滤波器后, 控制环路有可能会变得不稳定。如图 7 所示, 需要考虑输入滤波器的 Q 值和输出阻抗。

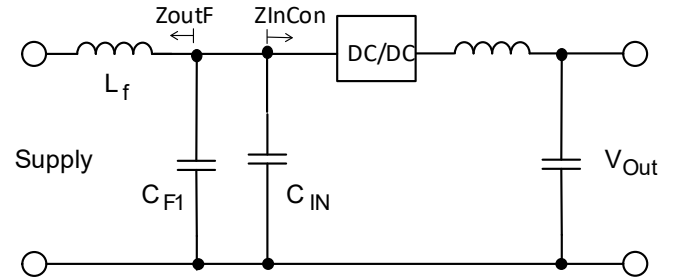


图 7: 输入滤波器和 DC/DC 转换器的阻抗

输入滤波器的输出阻抗 Z_{outF} 和 DC/DC 转换器的输入阻抗 Z_{inCon} 会发生相互干涉, 因此 LC 输入滤波器会对 DC/DC 转换器的控制环路产生影响。

LC 滤波器有可能造成相位余量减小, 暂态响应特性下降。

如果输入滤波器的 Q 值过大, 当 DC/DC 转换器输入端的输入电压发生变化时, 可能产生振荡现象, 控制环路可能会变得不稳定。

Q 值的定义如公式 (4) 所示。

$$(4) \quad Q = R_d \cdot \sqrt{\frac{C_{f1}}{L_f}}$$

此处所适用的稳定性原则，是输入滤波器的输出阻抗 Z_{outF} 必须小于 DC/DC 转换器输入 Z_{inCon} 的输入阻抗。

如公式 (5) 的说明。

$$(5) \quad Z_{outF} \ll Z_{inCon}$$

此外，输入滤波器的截止频率 f_{0F} 必须小于 DC/DC 转换器的过零频率 f_{0Con} 。

$$(6) \quad f_{0F} \ll f_{0Con}$$

如图 8 所示，当追加 RC 网络时，可以减小输入滤波器的 Q 值。

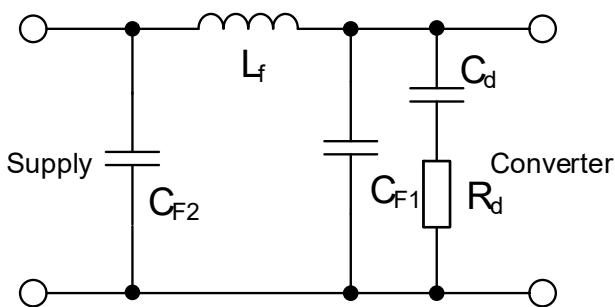


图 8: 包含阻尼网络的输入滤波器

电阻 R 的目的是使滤波器衰减，所串联电容器的目的是阻断输入电压的 DC 部分减小阻尼电阻上所产生的损耗。

公式 (7) 用来计算当滤波器的 Q 值 $Q_F=1$ 时的阻尼电阻的 R_d 。

$$(7) \quad R_d = \sqrt{\frac{L_f}{C_{f1}}}$$

RC 网络中电容器的容值 C_d 可以按照滤波器电容器 C_{f1} 的静电容量的 5 倍到 10 进行选择。

$$(8) \quad (5 \cdot C_{f1}) < C_d < (10 \cdot C_{f1})$$

考虑到成本和空间，可以在滤波器输出端并联电解电容作为滤波器来取代 RC 网络，同样可以起到一定的衰减效果，但是需要注意的是电解电容的 ESR 不能提供合适的衰减效果。

输入滤波器的位置

为了保证所期望的特性，需要将输入滤波器尽量靠近 DC/DC 转换器的输入端进行配置。

当由于基板条件制约，输入滤波器被配置得较远时，电源走线可能在输入滤波器和 DC/DC 转换器之间形成高频天线。该电源走线和外壳之间又通过寄生电容耦合，产生共模噪声，有可能形成辐射噪声。

从另一个角度看，电源走线的寄生感量和如图 2 所示的陶瓷电容 C_{f1} 连动形成 LC 滤波器，这样可以将纹波电压降到一定的低值，但是不足以将传导噪声减小到所要求的限值以内。

结论

输入滤波器被广泛应用于实现DC/DC转换器的EMC最优化设计，但是在设计时，需要注意不能使DC/DC转换器的控制环路稳定性出现问题。

当追加 π 型输入滤波器时，可以减小DC/DC转换器的输入纹波电压，因此可以抑制传导噪声。

为了避免发生不稳定问题，输入滤波器的输出阻抗需要配合DC/DC转换器的输入阻抗进行设计。

输入滤波器的Q值，可以通过使用RC阻尼网络进行降低。

By Stefan Klein, FAE, ATSC

Reference

- 1) Robert W. Erickson, and Maksimovic Dragan, Fundamentals of Power Electronics, Springer, 25. Mai 2012
- 2) R. D. Middlebrook, Null double injection and the extra element theorem, IEEE Trans. Educ., vol. 32, no. 3, pp. 167 – 180, Aug. 1998
- 3) Florian Hämmerle, Bode 100 – Application Note, Input Impedance & Filter Stability, OMICRON Lab, 2017
- 4) Capacitor characteristics from Specification of GCM series, Murata Manufacturing

Notes

- 1) The information contained herein is subject to change without notice.
- 2) Before you use our Products, please contact our sales representative and verify the latest specifications :
- 3) Although ROHM is continuously working to improve product reliability and quality, semiconductors can break down and malfunction due to various factors.
Therefore, in order to prevent personal injury or fire arising from failure, please take safety measures such as complying with the derating characteristics, implementing redundant and fire prevention designs, and utilizing backups and fail-safe procedures. ROHM shall have no responsibility for any damages arising out of the use of our Products beyond the rating specified by ROHM.
- 4) Examples of application circuits, circuit constants and any other information contained herein are provided only to illustrate the standard usage and operations of the Products. The peripheral conditions must be taken into account when designing circuits for mass production.
- 5) The technical information specified herein is intended only to show the typical functions of and examples of application circuits for the Products. ROHM does not grant you, explicitly or implicitly, any license to use or exercise intellectual property or other rights held by ROHM or any other parties. ROHM shall have no responsibility whatsoever for any dispute arising out of the use of such technical information.
- 6) The Products specified in this document are not designed to be radiation tolerant.
- 7) For use of our Products in applications requiring a high degree of reliability (as exemplified below), please contact and consult with a ROHM representative : transportation equipment (i.e. cars, ships, trains), primary communication equipment, traffic lights, fire/crime prevention, safety equipment, medical systems, servers, solar cells, and power transmission systems.
- 8) Do not use our Products in applications requiring extremely high reliability, such as aerospace equipment, nuclear power control systems, and submarine repeaters.
- 9) ROHM shall have no responsibility for any damages or injury arising from non-compliance with the recommended usage conditions and specifications contained herein.
- 10) ROHM has used reasonable care to ensure the accuracy of the information contained in this document. However, ROHM does not warrants that such information is error-free, and ROHM shall have no responsibility for any damages arising from any inaccuracy or misprint of such information.
- 11) Please use the Products in accordance with any applicable environmental laws and regulations, such as the RoHS Directive. For more details, including RoHS compatibility, please contact a ROHM sales office. ROHM shall have no responsibility for any damages or losses resulting non-compliance with any applicable laws or regulations.
- 12) When providing our Products and technologies contained in this document to other countries, you must abide by the procedures and provisions stipulated in all applicable export laws and regulations, including without limitation the US Export Administration Regulations and the Foreign Exchange and Foreign Trade Act.
- 13) This document, in part or in whole, may not be reprinted or reproduced without prior consent of ROHM.



Thank you for your accessing to ROHM product informations.
More detail product informations and catalogs are available, please contact us.

ROHM Customer Support System

<https://www.rohm.com.cn/contactus>