

Tech Web Hand Book

开关电源 EMC 基础和降噪对策

— 目录 —

前言	1
1. EMC 基础	1
1.1 什么是 EMC	1
1.2 什么是频谱	2
1.3 波形变化和频谱变化.....	2
1.4 共模噪声和常模噪声	5
1.5 什么是串扰	7
1.6 开关电源产生的噪声	8
2. 开关电源降噪对策	10
2.1 降噪对策和产品开发阶段	10
2.2 降噪对策的步骤	10
2.3 开关电源的降噪对策基础	11
2.4 开关电源的输入滤波器概述	11
3. 使用电容器降低噪声	12
3.1 电容器的频率特性	12
3.2 使用电容器降低噪声	13
3.3 去耦电容器的有效使用方法 要点 1	14
3.4 去耦电容器的有效使用方法 要点 2	15
3.5 去耦电容器的有效使用方法 注意事项	16
3.6 去耦电容器的有效使用方法 小结	17
4. 使用电感降低噪声	18
4.1 电感的频率特性	18
4.2 使用电感降低噪声	19
4.3 使用铁氧体磁珠降低噪声	20
4.4 使用共模滤波器降低噪声	22
4.5 使用电感降低噪声 注意事项	22
4.6 使用电感降低噪声 小结	23
5. 其他降噪对策	25
5.1 RC 缓冲电路	25
6. 总结	25
修订记录	26
注意事项	27

前言

在电子产品世界中，“噪声”是一个不容忽视的重要问题，而无论在哪个领域，都需要采取降噪措施来解决“噪声”这个普遍课题。电子设备的精度和分辨率受制于信噪比。此外，噪声辐射过大的产品可能会对其他设备造成不利影响，在某些情况下甚至可能还会导致严重事故。因此，噪声在世界各地均受到有关法律法规的约束，在日本有《电气用品安全法》，在美国有 FCC，在欧盟有英国等不同国家和地区的标准，除此之外，还有 CISPR、IEC 和 ISO 等国际标准。不符合这些安全标准的产品不能在相应的国家和地区出售，也不能进口和出口。

近年来，从 EMC—电磁兼容性的角度来看，处理噪声问题也变得非常必要。在本书中，我们将对 EMC 的基础知识和降噪对策进行探讨，但是“降噪对策”将围绕 Tech Web 的主题之一“开关电源”展开。

1. EMC 基础

作为 EMC 的基础知识，让我们先来熟悉一下与 EMC 有关的术语。相关的英语缩写较多，EMC 也是其中之一，下面将列出一些相似的缩写。EMC 概念和术语已经被明确定义为国际标准，因此需要正确理解每个术语的含义。

1.1 什么是 EMC

EMC 是电磁兼容性 (Electromagnetic Compatibility) 的缩写，在日语中多用“電磁両立性”或“電磁適合性”等字样来表达，可能还有其他一些表述方式。意为“不对其他设备产生电磁干扰，即使受到来自其他设备的电磁干扰，仍保持

原有的性能”，因需要兼备这两种性能而被称为“电磁兼容性”。

“不对其他设备产生电磁干扰”是指如果不意识地确保这一性能就会给其他设备带来电磁干扰。EMI (Electromagnetic Interference) 是表示电磁干扰 (电磁干涉、电磁妨碍) 的术语。由于发射电磁波会导致干扰，所以经常与“Emission” (辐射、发射) 这一术语成对使用。从开关电源方面讲，是指因开/关工作而产生开关噪声。

与之相反的“即使受到来自其他设备的电磁干扰”相关的术语是 EMS (Electromagnetic Susceptibility) —电磁敏感性。EMS 多与 Immunity (耐受性、抗扰度、排除能力) 成对使用。要求具备“即使受到 EMI，也不会引起误动作等问题”的耐受能力。

EMI 分为传导噪声 (Conducted Emission) 和辐射噪声 (Radiated Emission) 两种。这两个术语在日语中用日语表达多于用英语缩写表达。传导噪声是指经由线体或 PCB 板布线传导的噪声。辐射噪声是指排放 (辐射) 到环境中的噪声。对于这些噪声，EMS 中分别都有耐受性要求。它们的关系如下。此外，表 1 中总结了每个术语的含义。

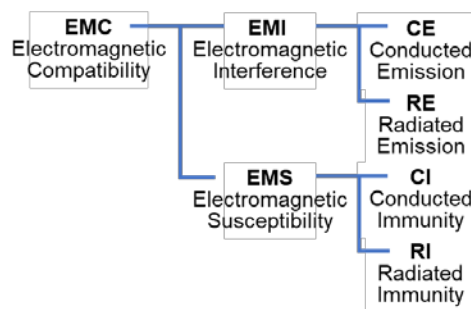


图 1. EMC 相关的术语及其关系

术语	意义	特别说明
EMC: Electromagnetic Compatibility 电磁兼容性	不对其他设备产生电磁干扰，即使受到来自其他设备的电磁干扰，仍保持原有的性能。	因需要兼备 EMI 和 EMS 两方面的性能而被称为“电磁兼容性”。
EMI: Electromagnetic Interference 电磁干扰、电磁干涉、电磁妨碍	因发射/排放 (Emission) 电磁波而对环境造成的干扰。	从 EMC 的角度看，要求不发射 EMI 或使 EMI 保持在最低限度。
EMS: Electromagnetic Susceptibility 电磁敏感性	对电磁波干扰 (EMI) 的耐受性/抗扰度 (Immunity)。	从 EMC 的角度看，要求即使受到 EMI 也不会受到干扰的抗扰度。
传导噪声 Conducted Emission	经由线体或 PCB 板布线而传导的噪声。	
辐射 (发射) 噪声 Radiated Emission	排放 (辐射) 到环境中的噪声。	

表 1. EMC 相关的术语及其含义

1.2 什么是频谱

根据日文版“大英百科全书 小项目版（支持电子版）”的解释，“将电磁波分解为正弦波分量，并按波长顺序排列的波谱”，将该释义扩展开来就是“将具有复杂组成的东西分解为单纯成分，并把这些成分按其特征量的大小依序排列（部分省略）”。这里介绍的频谱是指电气信号的频谱。具体来说，是基于通称“频谱分析仪”的频谱分析仪器的数据（将横轴作为频率，将纵轴作为功率或电压）进行介绍。

首先来看图 2 的原理示意图。本文的主题是“开关电源的 EMC”，因此电气信号是以开关信号为前提的。在表示开关信号的脉冲波形中，包括 t_w （脉冲宽度）和 t_s （上升/下降时间）。

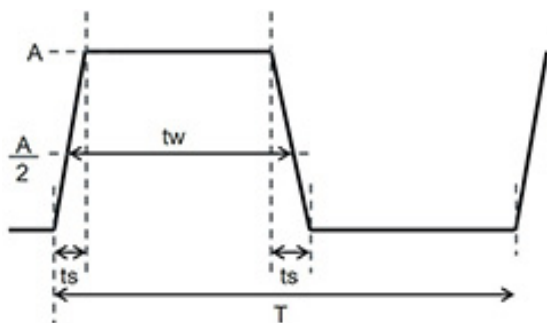


图 2. 开关信号的脉冲波形示意图

图 3 的上图是基于傅里叶变换的理论上的脉冲波形频谱。这是一个常见频谱，振幅随着频率的升高而衰减，衰减斜率随着 t_w 和 t_s 而变化。下图表示脉冲的 t_s 变慢后的频谱变化。

斜率变为 -40dB/dec 时的 $1/\pi t_s$ 频率降低是理所当然的，最终结果是其后的振幅减少。简而言之就是“当 t_s 延迟时频谱的振幅衰减”。

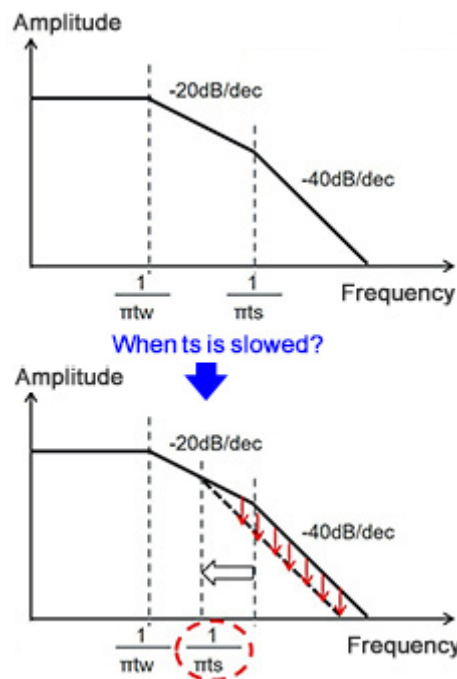


图 3. 基于傅里叶变换的理论上的脉冲波形频谱（上图）和 t_s 变慢时的变化（下图）

1.3 波形变化和频谱变化

使用实际的频谱分析仪数据来显示频率等其他参数变化时的频谱变化。这里的关键点是“对于信号波形的变化，频谱将以怎样的趋势变化”。这是用来通过实际的开关电源电路的开关相关的频谱来分析并解决 EMC 问题时所需要的知识。

图 4 中的图形是初始条件下的数据，用来比较。最上面的波形图中的条件是：振幅 10V，频率 400kHz，Duty（占空比）50%， t_r/t_f （上升时间/下降时间）10ns。

中间的图表示 n 次谐波和振幅（V）的关系。1 倍的频率 = 基波，也就是说 400kHz 的分量最大，以奇数倍的频率形成频谱。仅产生奇次谐波是 Duty 为 50%（=1:1）的频谱特征。各分量的大小为基波分量的 $1/n$ ，例如 3 次谐波分量为 $1/3$ ， n 次谐波分量为 $1/n$ 。

最下面的图是振幅为 $\text{dB}\mu\text{V}$ 的对数曲线图。顺便提一下，

dB μ V 是基于以 1 μ V 电压为基准的电压比的 dB 值 (1 μ V = 0dB μ V)。

①将频率提高到 2MHz 时的频谱 (图 5)。从频率—振幅 (dB μ V) 关系图可以明确看出,当基波频率增高时,整个频谱会向右 (频率高的一侧) 偏移。

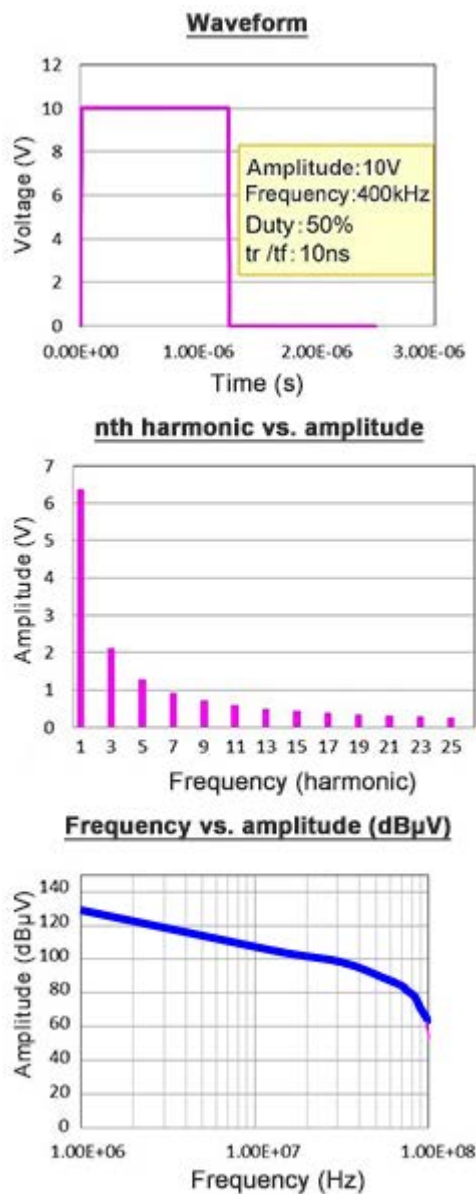


图 4. 比较用的初始条件下的数据

针对这个波形,进行①增加频率,②减慢上升/下降速度,③改变占空比,④仅减慢上升速度这四点变更时,相应的数据如下:

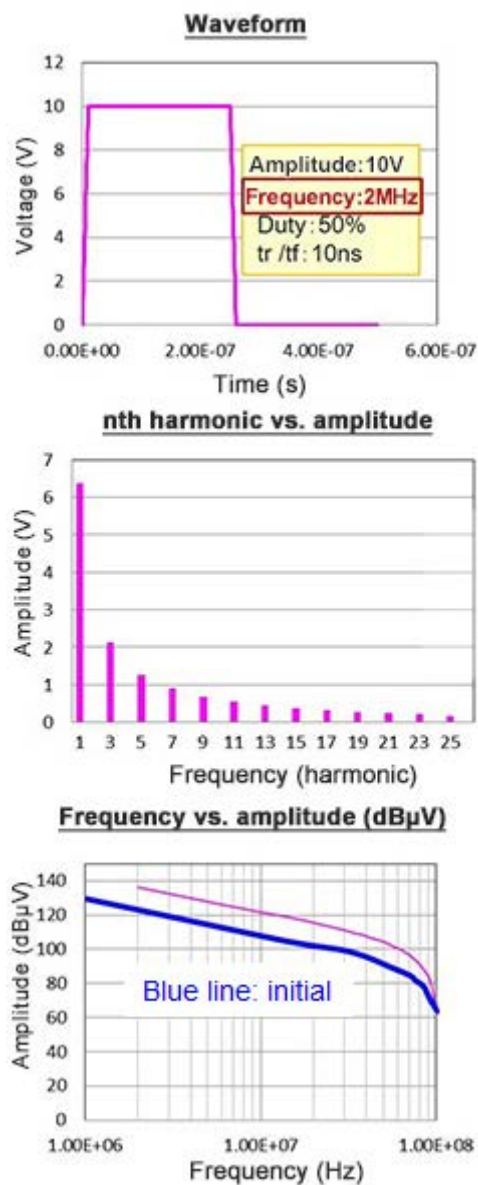


图 5. ①将频率变更为 2MHz 时的频谱

② t_r 和 t_f 的速度都减慢为 100ns 时的频谱 (图 6)。结果如示意图所示, 由于进入 -40dB/dec 衰减时的频率降低, 因此高次谐波的频谱振幅衰减。

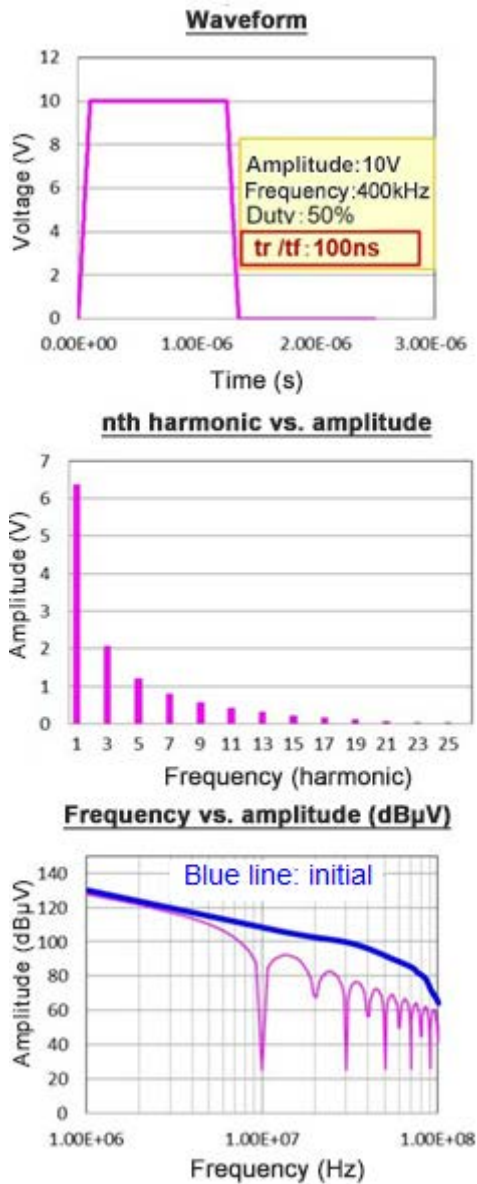


图 6. ② t_r 和 t_f 的速度都减慢为 100ns 时的频谱

③ 将 Duty 从 50% 变为 20% 时的频谱 (图 7)。由于 Duty 不是 1:1, 因此会产生偶次谐波, 但峰值基本上没变化。随着脉冲宽度 t_w 变窄, 基波频谱的振幅衰减。

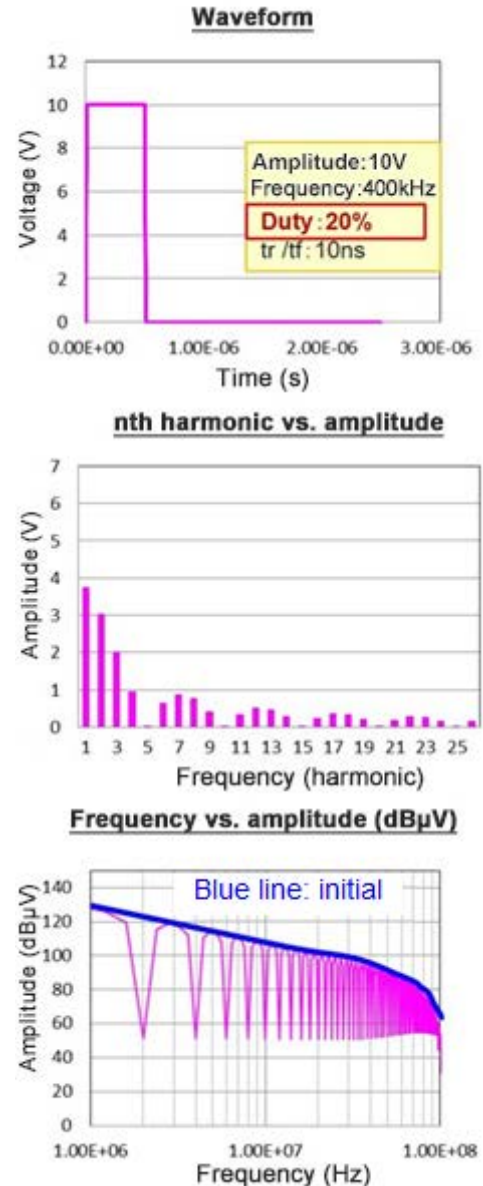


图 7. ③ 将 Duty 从 50% 变为 20% 时的频谱

④仅将 t_r (上升时间) 减慢时的频谱 (图 8)。 t_r 相关的高次谐波分量因 t_r 变慢而衰减。

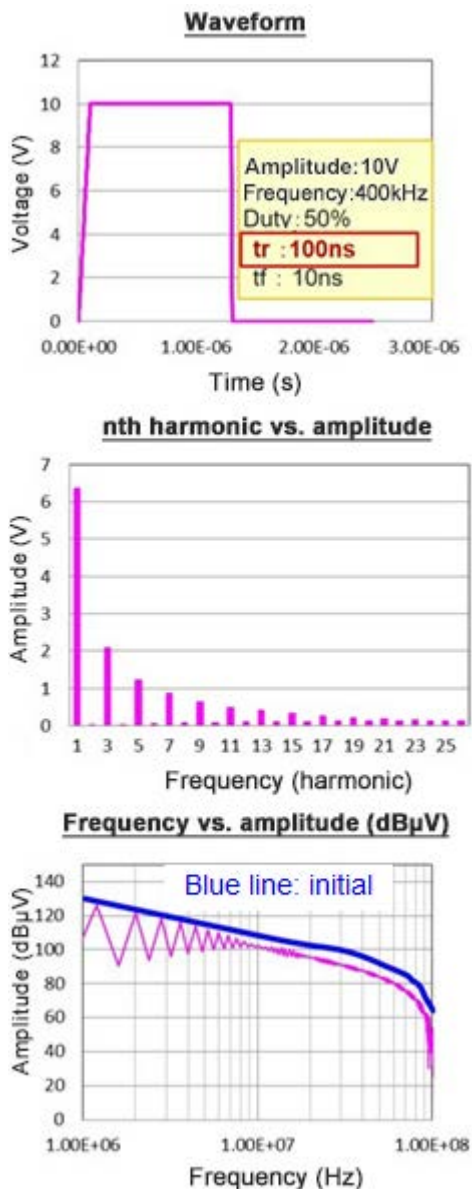


图 8. ④仅将 t_r (上升时间) 减慢时的频谱

下面列出每种结果:

- ①频率升高 \Rightarrow 频谱整体向右移。
- ②上升/下降速度减慢 \Rightarrow 进入-40dB/dec 衰减时的频率降低, 高次谐波频谱振幅衰减。
- ③改变 Duty \Rightarrow 产生偶次谐波, 但对谱峰无影响。基波频谱衰减。

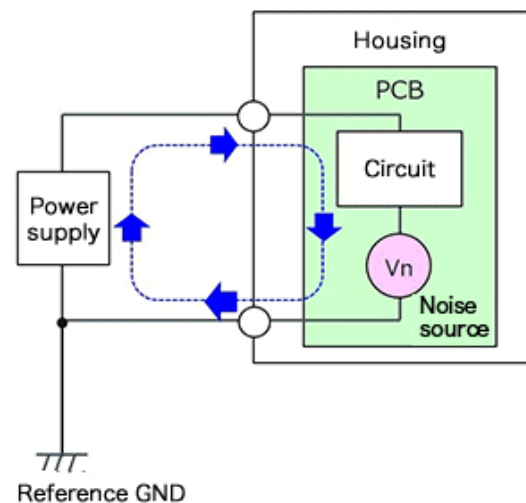
④仅上升速度减慢 \Rightarrow 上升分量相关的高次谐波衰减。

总而言之, 当基波频率较低且上升/下降较慢时, 谐波频谱会衰减。从 EMC 的角度来看, 也就是频谱的振幅较低时更有利。

1.4 共模噪声和常模噪声

前面提到, 电磁干扰 EMI 大致可分为“传导噪声”和“辐射噪声”两种。其中, 传导噪声根据传导方式可分为“差模噪声”和“共模噪声”两种。“差模噪声”也称为“常模噪声”。这两种称呼有时可根据条件区分使用, 不过在本文中作为相同的名词处理。用来进行说明的图例是将印刷电路板 (PCB) 装在壳体中, 并由外部供电的示例图。

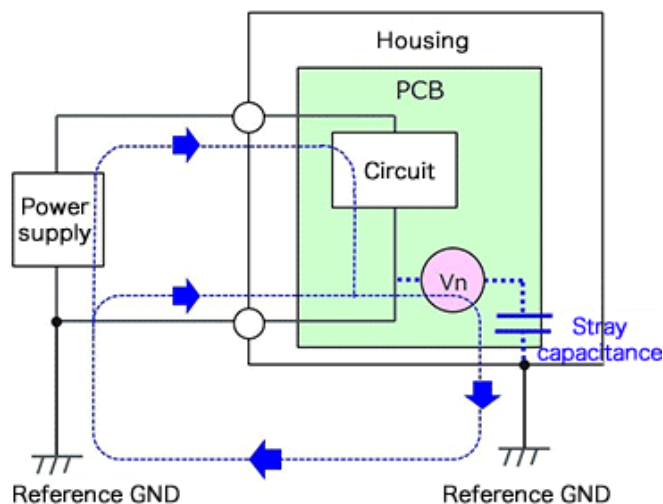
图 9 表示差模噪声的传导路径。噪声源对于电源线串联进入, 噪声电流与电源电流方向相同, 在电源线之间产生差模噪声。由于往返方向相反而被称为“差模 (Differential mode)”。



- A mode in which a noise current flows on the same path as the power supply current
- Noise voltage occurs across power supply lines

图 9. 差模 (常模) 噪声

图 10 表示共模噪声的传导路径。共模噪声是经杂散电容等泄漏的噪声电流经由大地返回电源线的噪声。因电源的（+）端和（-）端流过的噪声电流方向相同而被称为“共模（Common mode）”。在电源线间不产生噪声电压。



- Noise voltage does not occur across power supply lines
- Noise voltage occurs across power supply line and reference GND
- Noise currents flow in the same direction on the power supply positive and negative sides

图 10. 共模噪声

如前所述，这些噪声就是传导噪声。由于电源线中流动着噪声电流，因此会发出噪声。

由差模噪声引起的辐射的电场强度 E_d 可通过图 11 中的公式来表示。 I_d 为差模中的噪声电流， r 为到观测点的距离， f 为噪声频率。差模噪声会产生噪声电流环，因此环路面积 S 是非常重要的因素。如图和公式所示，假设其他因素固定，环路面积越大则电场强度越高。

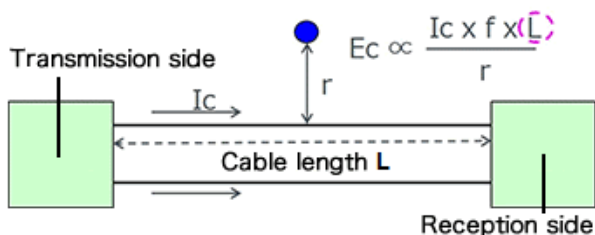


图 11. 差模噪声引起的辐射和电场强度

此外，由共模噪声引起的辐射的电场强度 E_c 可通过图 12 中的公式来表示。如图和公式所示，线缆长度 L 是非常重要的因素。

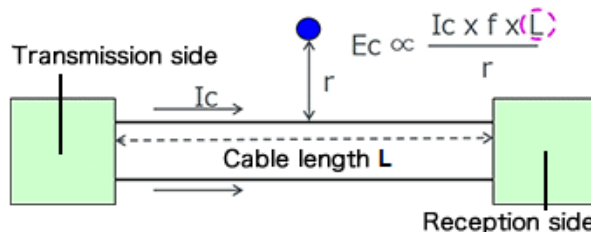
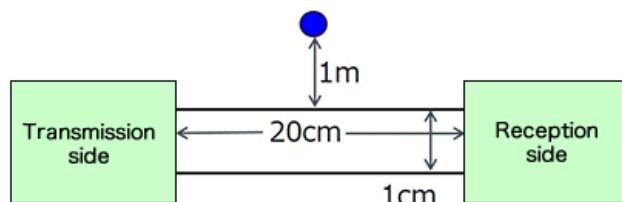


图 12. 共模噪声引起的辐射和电场强度

为了更好地认识每种噪声引发的辐射特点，接下来代入实际数值来计算一下电场强度*1（图 13）。条件完全相同。电场强度的观测点用蓝色圆点来表示。

*1: 公式来源：EMC 工学详解 实用降噪技法 作者 Henry W.Ott
— 东京电机大学出版社



Differential mode noise

For a 100 MHz differential mode noise current of $1 \mu\text{A}$ flowing in a loop of area 20 cm^2

The value of the electric field intensity at a distance of 1 m (90°) is:

$$E_d = 1.316 \times 10^{-14} \times \frac{I_d \times f^2 \times S}{r}$$

$$= 1.316 \times 10^{-14} \times \frac{1\mu\text{A} \times (100\text{MHz})^2 \times (0.2 \times 0.01)}{1}$$

$$= \mathbf{0.26\mu\text{V/m}}$$

Common mode noise

For a 100 MHz common mode noise current of $1 \mu\text{A}$ flowing in a 20 m cable

The value of the electric field intensity at a distance of 1 m (90°) is:

$$E_c = 1.257 \times 10^{-6} \times \frac{I_c \times f \times L}{r}$$

$$= 1.257 \times 10^{-6} \times \frac{1\mu\text{A} \times 100\text{MHz} \times 0.2}{1}$$

$$= \mathbf{25.1\mu\text{V/m}}$$

图 13. 每种噪声的电场强度计算示例

这个计算结果中非常重要的一点是：噪声电流值相同的情况下，共模噪声辐射要大得多（在本例中约大 100 倍）。不管怎样，这些传导噪声和辐射噪声即 EMI 如果超出了容许范围，就需要采取降噪对策。特别是在考虑辐射噪声对策时，针对共模噪声的对策尤为重要。

后续会介绍具体对策，其中原则性的降噪对策是差模噪声要减少环路面积 S（比如线缆采用绞合线），共模噪声要极力缩短线缆长度。不过一定会遇到受配置和材料等因素限制的情况，此时就需要探讨增加滤波器的方法。

<小结>

- 电磁干扰 EMI 大致可分为“传导噪声”和“辐射噪声”两种。
- 传导噪声可分为“差模（常模）噪声”和“共模噪声”两种。
- 关于辐射噪声，差模噪声的线缆环路面积、共模噪声的线长是非常重要的因素。
- 注意：即使条件相同，共模噪声带来的辐射远远大于差模噪声。

1.5 什么是串扰

串扰是由于线路之间的耦合引发的信号和噪声等的传播，也称为“串音干扰”。“串音”是模拟通讯时代的术语，是字如其意、一目了然的表达。

两根线（也包括 PCB 的薄膜布线）独立的情况下，相互间应该不会有电气信号和噪声等的影响，但尤其是两根线平行的情况下，会因存在于线间的杂散（寄生）电容和互感而引发干扰。所以，串扰也可以理解为感应噪声。

线间耦合有杂散（寄生）电容引发的电容（静电）耦合和互感引发的电感（电磁）耦合。这些耦合现象会引发干扰。图 14 和图 15 为每种耦合的示意图以及最简化的等效电路。

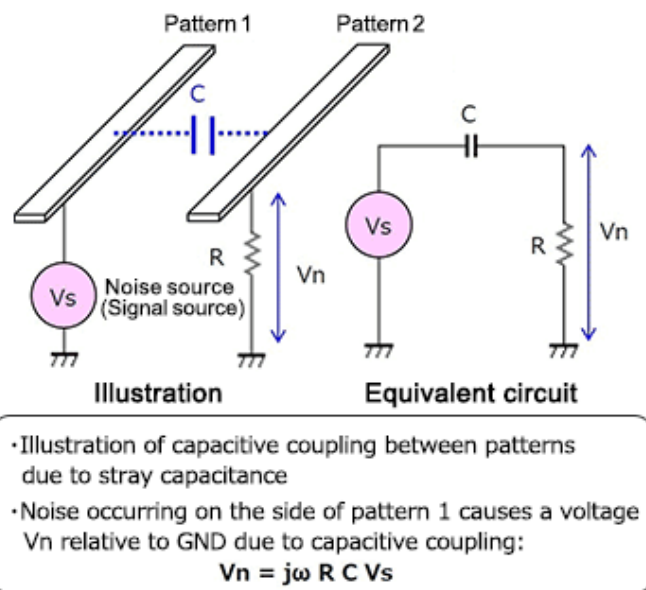


图 14. 串扰：电容耦合示意图和等效电路

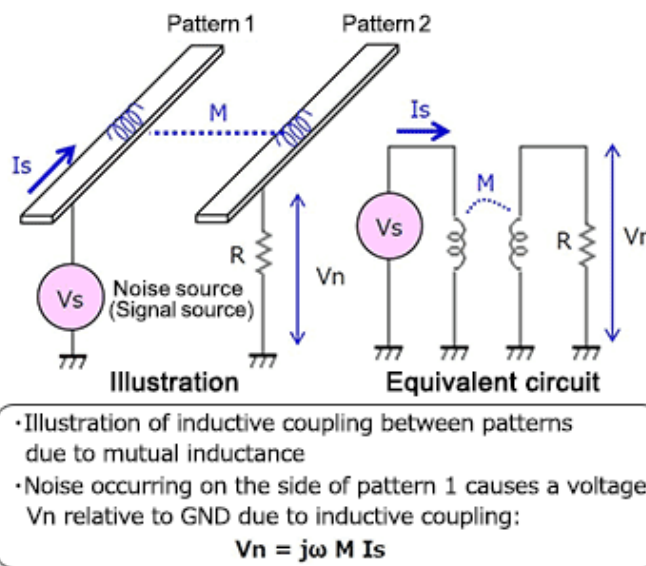


图 15. 串扰：电感耦合示意图和等效电路

图 14 和图 15 中均用公式*2 给出了从噪声源的布线模式 1 到附近的布线模式 2 所产生的噪声电压 V_n 。R 为电阻，C 为电容，M 为互感， V_s 为噪声源电压， I_s 为噪声源电流。

*2: V_n 计算公式来源—EMC 工学详解 实用降噪技法 作者 Henry W.Ott
 —东京电机大学出版社

<小结>

- 平行的布线间会产生串扰。
- 串扰的因素有杂散（寄生）电容引发的电容（静电）耦合和互感引发的电感（电磁）耦合。

1.6 开关电源产生的噪声

首先，使用同步整流型降压 DC/DC 转换器的等效电路来了解一下开关电流的路径。

SW1 为高边开关，SW2 为低边开关。

SW1 导通（SW2 为 OFF 状态）时，电流路径是从输入电容器到 SW1、再经由电感 L 到输出电容器（图 16）。

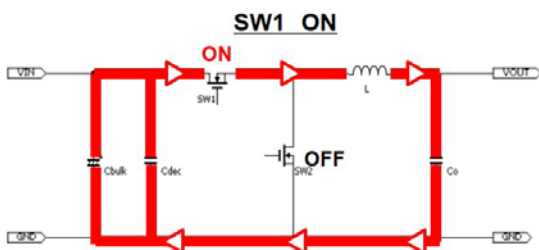


图 16. 同步整流型降压 DC/DC 转换器的等效电路：

SW1（高边开关）ON 时的电流路径

SW2 导通（SW1 为 OFF 状态）时，电流路径是从 L 经由输出电容器到 SW2。

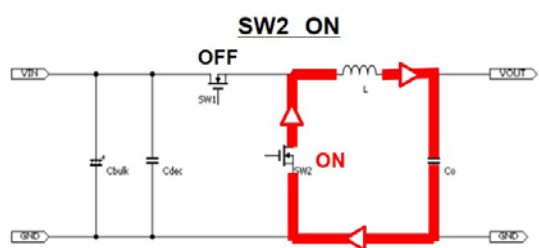


图 17. 同步整流型降压 DC/DC 转换器的等效电路：

SW2（低边开关）ON 时的电流路径

图 18 表示这些电流路径之间的差异，每当开关 ON/OFF 时，红色线路的电流都会急剧变化。

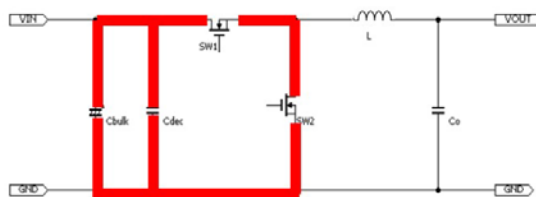


图 18. 同步整流型降压 DC/DC 转换器的等效电路：

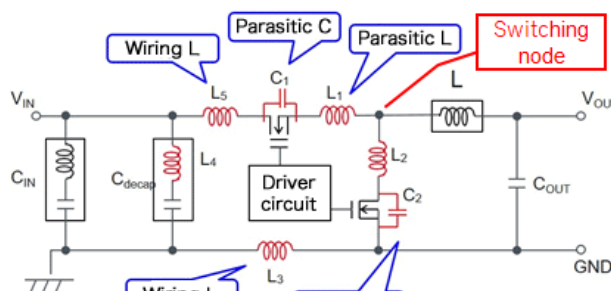
图 16 和图 17 的电流通路差异

该环路的电流变化非常剧烈，所以会因 PCB 布线的电感分量而在环路内产生高频振铃。产生的电压可通过下列公式来计算。

$$V = L \times \frac{dI}{dt}$$

例如，如果在电感分量为 10nH 的布线中 1A 电流在 10ns 内变化，则将产生 1V 电压。

图 19 表示构成电源电路的外置部件以及实装电路板的寄生分量和振铃之间的关系。



· Wiring inductance L is roughly 1 nH per mm

· Rise/fall time for a switching MOSFET is several ns

$$I = C \times \frac{dV}{dt} \quad V = L \times \frac{dI}{dt}$$

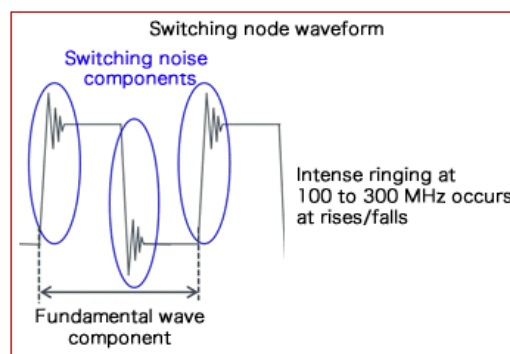


图 19. 构成电源电路的外置部件以及实装电路板的寄生分量和振铃之间的关系

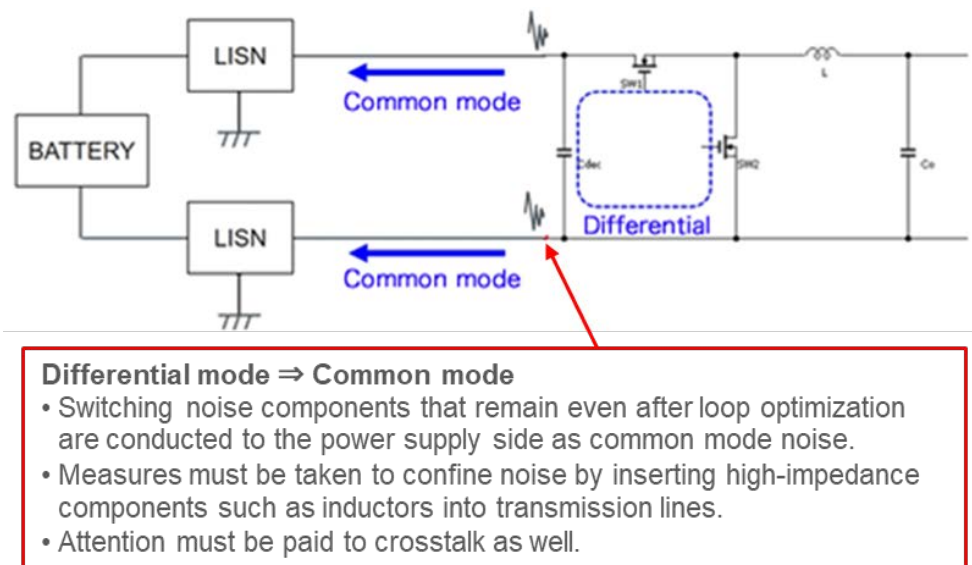


图 20. 开关电源电路产生的噪声

红色部分标出的是图 18 所表示的电流在急剧变化的环路中的寄生分量。布线中存在布线电感，通常每 1mm 有 1nH 左右的电感。另外，电容器中存在等效串联电感 ESL，MOSFET 的各引脚间存在寄生电容。因此，如图 19 红框内的波形图所示，开关节点将产生 100MHz~300MHz 的振铃。所产生的电流和电压，可通过图 19 给出的两个公式求得。

这种振铃会作为高频开关噪声带来各种影响。值得一提的是，即使优化环路，残留的开关噪声成分也会作为共模噪声传导到电源端（图 20）。

虽然有采取相应的措施，但由于无法从电源 IC 处去除安装电路板的寄生分量，因此只能通过 PCB 板布局设计及采用去藕电容来解决。

<小结>

- 在开关时会产生急剧电流 ON/OFF 的环路中，会因寄生分量产生高频振铃（=开关噪声）。
- 可通过优化 PCB 布线等做法来降低这种开关噪声，但即使这样，残留的噪声也会作为共模噪声传导至输入电源，因此需要采取防止噪声漏出的措施。

2. 开关电源的降噪对策

在对实际的降噪对策进行具体说明之前，先简单介绍一下对策步骤和对策基础。

2.1 降噪对策和产品开发阶段

先来了解一下从产品的设计/开发到量产的过程中，应该在哪些阶段采取降噪措施。图 21 是相对于设计/开发、评估、量产的时间轴，采取降噪对策的灵活性（即可以采取的对策的选项多少）以及对策所需成本的示意图。纵轴可以理解为越往上越“高”。

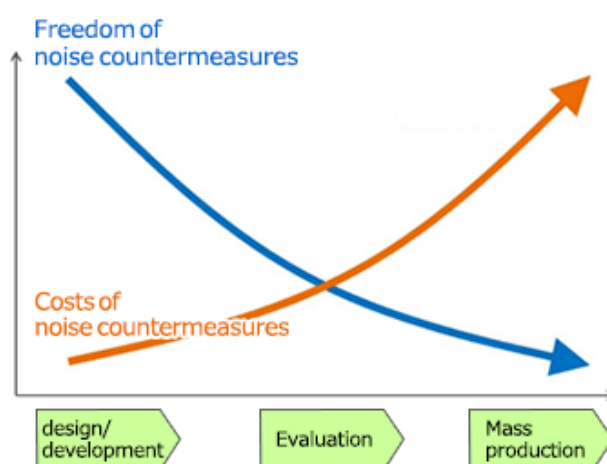


图 21. 降噪对策和产品开发阶段

通过图 21 可以看出，随着开发进程的推进，可使用的降噪技术和手段越来越有限，对策成本也越来越高。开始量产后发现噪声问题，想采取对策，但无奈产品已成型，束手无策，最终只能更改 PCB，这是谁也不希望发生的事。

大原则是，在产品开发的初期阶段，预先进行充分的探讨与评估，这样，即使发现噪声问题，也可以从容而有效地采取降噪措施。另外还有一点非常重要，那就是掌握噪声的种类和性质，并针对不同的噪声采取不同的有效对策。如果盲目地采取对策，常常会发生不仅降噪效果差，甚至导致噪声反而更严重的情况。

2.2 降噪对策的步骤

如前所述，盲目地采取措施只会增加损失。在确定对策之前，需要遵循几个步骤。步骤示例如下：

●步骤 1：把握开关波形的频率成分

需要确认开关频率、上升/下降、过冲/下冲、振铃等与基波同时产生的不同现象的频率成分。这有助于根据希望解决的目标噪声的频率来确定不同的对策方法和相应部件，如果选择不当，效果则可能不理想。

●步骤 2：把握噪声产生源与传导路径

确认所产生的开关噪声是从哪一路径传导到一次侧或二次侧的。降噪对策需要在噪声的传导路径实施。而且，必须对所有的传导路径采取对策。哪怕忽略了一处传导路径，对策也是不完全的。

●步骤 3：加强接地设计

降噪对策的最后一步是增加降噪部件，但在此之前应该先探讨加强 PCB（印刷电路板）的接地设计。出色的接地设计不仅可降低噪声，还是提升性能和稳定性的重要环节。通过加强接地设计，可降低环路的阻抗。另外，还可有效提升滤波器的效果。

●步骤 4：增加滤波器等降噪部件

最后是根据噪声的种类和性质，探讨相应的降噪对策部件并在电路中添加相应部件，比如通过滤波器来滤除、通过电容器来旁路滤除、通过芯片磁珠等的电阻成分来吸收噪声等。滤波器、旁路电容的效果如步骤 3 所述，会受接地设计好坏的影响，所以请务必先加强接地设计。

<小结>

- 随着开发进程的推进，可以使用的降噪对策技术和手段越来越有限，对策成本也越来越高。
- 在产品开发的初期阶段，预先进行充分探讨与评估，可以从容而有效地采取降噪对策。
- 掌握噪声的种类和性质，并针对不同的噪声采取不同的有效对策是非常重要的。
- 降噪对策按照“把握频率成分→把握产生源和传导路径→加强接地设计→增加降噪部件”的步骤进行。

2.3 开关电源的降噪对策基础

图 22 中总结了针对常见噪声（例如差模噪声、共模噪声和串扰）的基本对策。

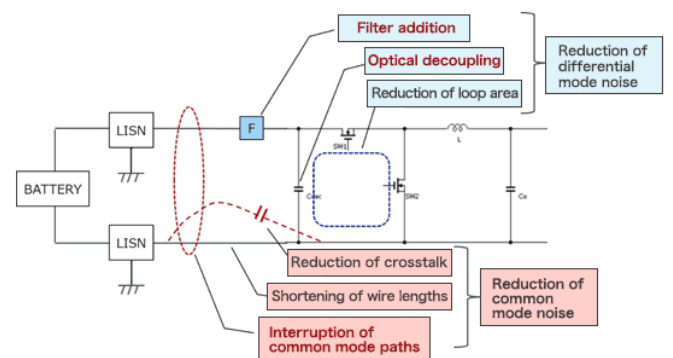


图 22. 针对常见噪声的基本对策

要想降低差模噪声（蓝色），可在电路板上缩小大电流路径的环路面积，并增加最优解耦和输入滤波器。尽可能地抑制噪声的发生源--差模噪声是非常重要的，这也关系到降低共模噪声。

而降低共模噪声（红色）的方法有缩短布线，抑制串扰，还有切断共模路径（增加阻抗）。

关于图中以红色字体显示的增加滤波器、解耦和切断共模路径（共模滤波器），后续会详细介绍。

<小结>

- 要想降低差模噪声，可在电路板上缩小大电流路径的环路面积，并增加最优解耦和输入滤波器。
- 尽可能地抑制噪声的发生源—差模噪声是非常重要的，也关系到降低共模噪声。
- 要想降低共模噪声，可缩短布线，抑制串扰，切断（滤波）共模路径。

2.4 开关电源的输入滤波器概述

开关电源的输入滤波器是针对共模噪声和差模噪声，分别采用适合不同噪声特性的滤波器。

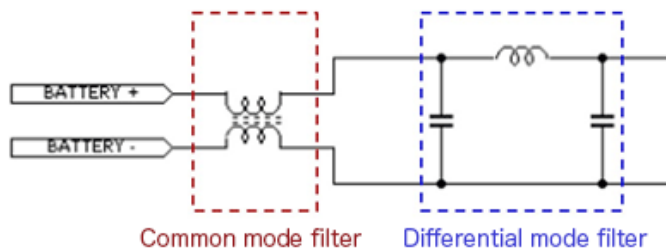


图 23. 有代表性的开关电源输入滤波器

●差模滤波器

差模滤波器采用电容器、电感、铁氧体磁珠和电阻等。图例中是使用了 LC 的 π 型滤波器。各部件对噪声具有如下作用：

- 电容器：将噪声电流旁路入地。
- 电感：反射噪声电流。
- 铁氧体磁珠：将噪声电流的低频信号通过电感成分反射、高频信号通过电阻成分转变为热。
- 电阻：将噪声电流转变为热。

●共模滤波器

对于共模噪声的对策是使用共模滤波器（共模扼流圈）。共模滤波器大致可以分为电源线路用和信号线路用两种。在开关电源的输入端一般使用电源线路用的共模滤波器。通过提高共模电流路径的阻抗来切断路径。

<小结>

- 开关电源的输入滤波器，需要针对共模噪声和差模噪声分别采用不同的处理。
- 对差模噪声使用由电容器、电感、磁珠、电阻等部件组成的滤波器。
- 对共模噪声使用共模滤波器。

3. 使用电容器降低噪声

在上一章中，介绍了开关电源输入用差模滤波器中包括电容器、电感、铁氧体磁珠和电阻等部件。本章将对使用电容和电感降噪的对策进行介绍，这类对策也可称为“降噪对策的基础”。在这里使用简单的四元件模型。如果要进一步表达高频谐振时，可能需要更多的元件模型。先从电容器开始。

3.1 电容器的频率特性

探讨利用电容器来降低噪声时，充分了解电容器的特性是非常重要的。图 24 为电容器的阻抗和频率之间的关系示意图，是电容器最基础的特性之一。

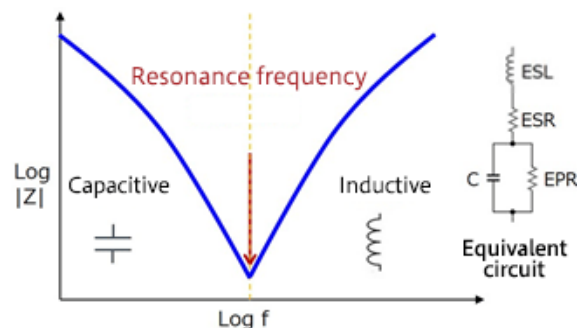


图 24. 电容器的频率特性示例

电容器中不仅存在电容量 C ，还存在电阻分量 ESR （等效串联电阻）、电感分量 ESL （等效串联电感）、与电容并联存在的 EPR （等效并联电阻）。 EPR 与电极间的绝缘电阻 IR 或电极间有漏电流具有相同的意义。可能一般多使用“ IR ”。

C 和 ESL 形成串联谐振电路，电容器的阻抗原则上呈上图所示的 V 字型频率特性。到谐振频率之前呈容性特性，阻抗下降。谐振频率的阻抗取决于 ESR 。过了谐振频率之后，阻抗特性变为感性，阻抗随着频率升高而升高。感性阻抗特性取决于 ESL 。

谐振频率可通过以下公式计算。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C \times ESL}}$$

从该公式可以看出，容值越小、 ESL 越低的电容器，谐振

频率越高。如果将其应用于噪声消除，则容值越小、 ESL 越低的电容器，频率越高，阻抗越低，因此可以很好地消除高频噪声。

虽然这里说明的顺序有些前后颠倒，不过使用电容器降低噪声的对策，是利用了电容器“交流通过时频率越高越容易通过”这个基本特性，将不需要的噪声（交流分量）经由信号、电源线旁路接地等。

图 25 为不同容值的电容器的阻抗频率特性。在容性区域，容值越大，阻抗越低。另外，容值越小，谐振频率越高，在感性区域阻抗越低。

简单来说，阻抗低的电容器具有出色的噪声消除能力，不同的电容器其阻抗的频率特性也不同，所以这一特性是非常重要的确认要点。选择降噪用电容器时，请根据阻抗的频率特性来选型（而非容值）。

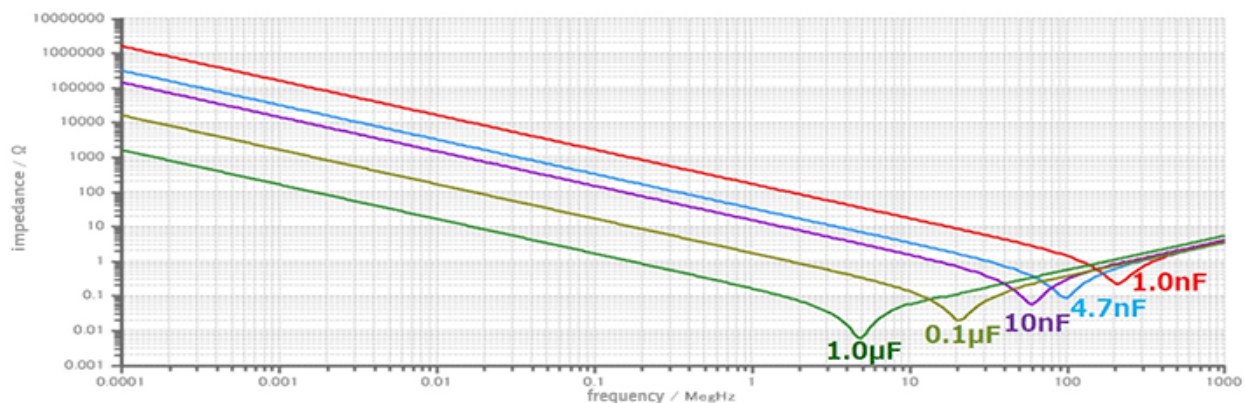


图 25. 不同电容的频率特性比较

选择降噪用电容器时，关键点在于，确认频率特性不是考虑电容量，而是考虑 LC 的串联谐振电路。

<小结>

- 降噪用电容器的选型需要根据阻抗的频率特性进行（而非容值）。
- 容值和 ESL 越小，谐振频率越高，高频区域的阻抗越低。
- 容值越大，容性区域的阻抗越低。
- ESR 越小，谐振频率的阻抗越低。
- ESL 越小，感性区域的阻抗越低。

3.2 使用电容器降低噪声

噪声分很多种，性质也是多种多样的。所以，降噪对策（即降低噪声的方法）也多种多样。在这里主要谈开关电源相关的噪声，因此，请理解为 DC 电压中电压电平较低、频率较高的噪声。另外，除电容外，还有齐纳二极管和噪声/浪涌/ ESD 抑制器等降噪部件。不同的噪声性质，所需要的降噪部件也各不相同。如果是 DC/DC 转换器，多数会根据其电路和电压电平，用 LCR 来降低噪声。

图 26 和 27 是通过添加电容器来降低 DC/DC 转换器输出电压噪声的示例。

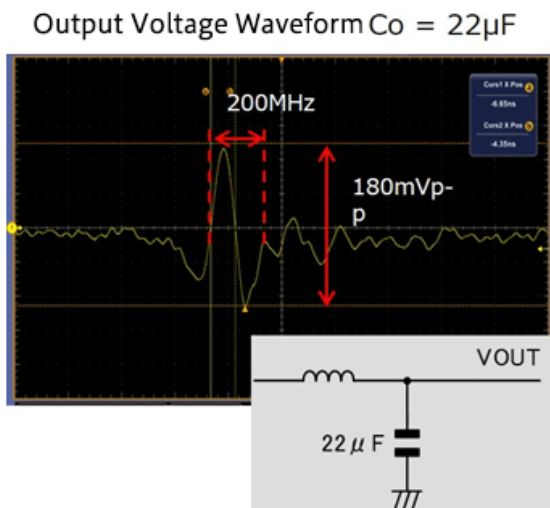


图 26. 输出 LC 滤波器的 C=22µF 时

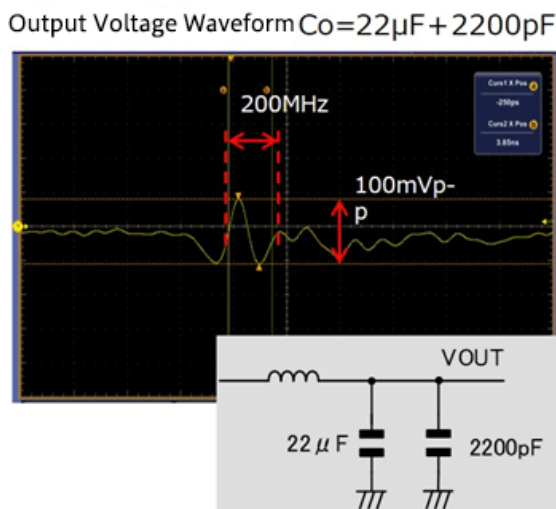


图 27. 输出 LC 滤波器添加 2200pF 电容器后

图 26 的波形是输出端 LC 滤波器的电容为 22µF 时，在约 200MHz 的频率范围存在 180mVp-p 左右的噪声（振铃、反射）。图 27 的波形是为了降低这种噪声而添加了 2200pF 电容器后的结果，可见当增加 2200pF 的电容器后，噪声衰减至 100mV 左右。

这里应该思考的是“为什么是 2200pF”。下面的图 28 为所添加电容器的阻抗频率特性。

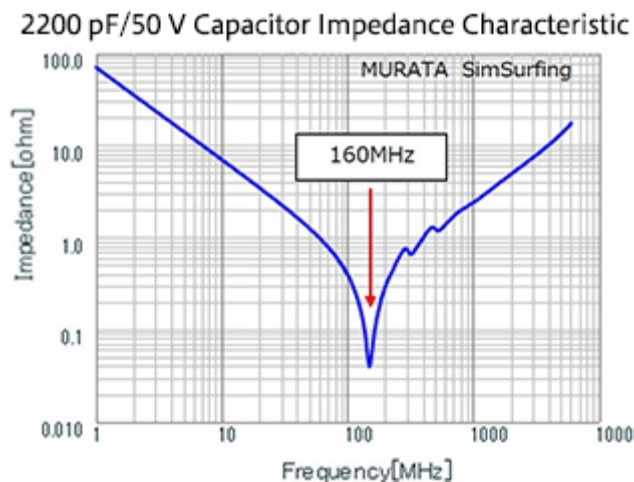


图 28. 添加的 2200pF 电容器的阻抗特性

如图 28 所示，之所以选择 2200pF 的电容，是因为阻抗在 160MHz 附近最低，利用这种阻抗特性，可降低噪声幅度约 200MHz。

这是通过添加电容器来降低目标噪声频率的阻抗，从而降低噪声幅度的手法。像这样通过添加电容器来降低噪声时，需要把握噪声（振铃、反射）的频率，并选择具有相应阻抗的频率特性的电容器。

<小结>

- 通过降低目标噪声频率的阻抗来降低噪声幅度。
- 降噪用电容器的选型需要根据阻抗的频率特性进行（而非容值）。

3.3 去耦电容器的有效使用方法 要点 1

要想有效地使用去耦电容器，大致有两个关键点，还有几个注意事项。

第一个要点是用多个（而非 1 个）电容器进行去耦的方法。使用多个电容器时，使用相同容值的电容器时和交织使用不同容值的电容器时，效果是不同的。

●使用多个容值相同的电容器时

图 29 是使用 1 个 22μF 的电容时（蓝色）、增加 1 个变为 2 个时（红色）、再增加 1 个变为 3 个（紫色）时的频率特性。

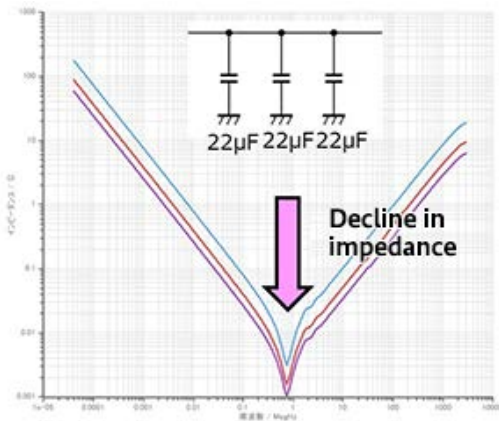


图 29. 使用多个容值相同的电容器时

如图所示，当增加容值相同的电容器后，阻抗在整个频率范围均向低的方向转变，也就是说阻抗越来越低。

这一点可通过思考并联连接容值相同的电容时，到谐振点的容性特性、取决于 ESR（等效串联电阻）的谐振点阻抗、谐振点以后的 ESL（等效串联电感）影响的感性特性来理解。

并联的电容容值是相加的，所以 3 个电容为 66μF，容性区域的阻抗下降。

谐振点的阻抗是 3 个电容的 ESR 并联，因此为

$$\frac{1}{ESR_1} + \frac{1}{ESR_2} + \frac{1}{ESR_3}$$

假设这些电容的 ESR 全部相同，则 ESR 减少至 1/3，阻抗也下降。

谐振点以后的感性区域的 ESL 也是并联的，因此为

$$\frac{1}{ESL_1} + \frac{1}{ESL_2} + \frac{1}{ESL_3}$$

假设 3 个电容的 ESL 全部相同，则 ESL 减少至 1/3，阻抗也下降。

由此可知，通过使用多个相同容值的电容器，可在整个频

率范围降低阻抗，因此可进一步降低噪声。

●使用多个容值不同的电容器时

图 30 是在 22μF 的电容基础上并联增加 0.1μF、以及 0.01μF 的电容后的频率特性。

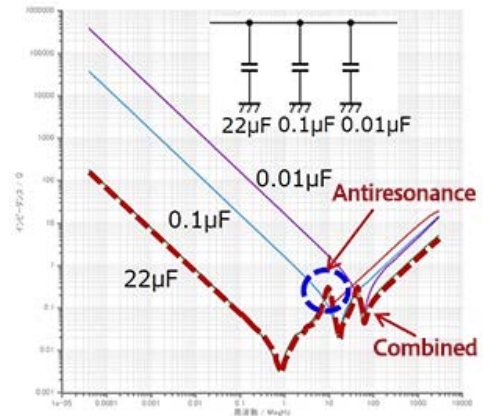


图 30. 使用多个容值不同的电容器时

通过增加容值更小的电容，可降低高频段的阻抗。相对于一个 22μF 电容的频率特性来说，0.1μF 和 0.01μF 的特性是合成后的特性（红色虚线）。

这里必须注意的是，有些频率点产生反谐振，阻抗反而增高，EMI 恶化。反谐振发生于容性特性和感性特性的交越点。

所增加电容器的电容量，一般需要根据目标降噪频率进行选型。

另外，在这里给出的频率特性波形图是理想的波形图，并未考虑 PCB 板的布局布线等引起的寄生分量。在实际的降噪对策中，需要考虑寄生分量的影响。

3.4 去耦电容器的有效使用方法 要点 2

去耦电容器的有效使用方法的第二个要点是降低电容的 ESL（即等效串联电感）。虽说是“降低 ESL”，但由于无法改变单个产品的 ESL 本身，因此这里是指“即使容值相同，也要使用 ESL 小的电容器”。通过降低 ESL，可改善高频特性，并可更有效地降低高频噪声。

●即使容值相同也要使用尺寸较小的电容器

对于积层陶瓷电容器（MLCC），有时会准备容值相同但尺寸不同的几个封装。ESL 取决于引脚部位的结构。尺寸较小的电容器基本上引脚部位也较小，通常 ESL 较小。

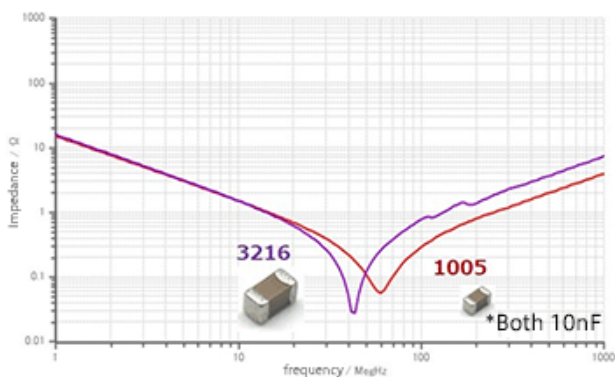


图 31. 使用多个容值不同的电容器时

图 31 是容值相同、大小不同的电容的频率特性示例。如图所示，更小的 1005 尺寸的谐振频率更高，在之后感性区域的频率范围阻抗较低。这正如在“3.1 电容的频率特性”中所介绍的，电容的谐振频率是基于以下公式的，从公式中可以看出，只要容值相同，ESL 越低谐振频率越高。另外，感性区域的阻抗特性取决于 ESL，这一点也曾介绍过。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C \times ESL}}$$

●使用旨在降低 ESL 的电容器

积层陶瓷电容器中，有些型号采用的是旨在降低 ESL 的形状和结构。

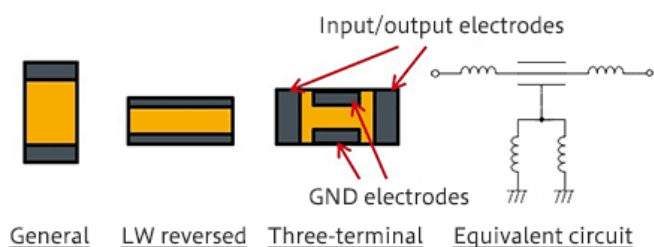


图 32. 普通的电容器和旨在降低 ESL 的电容器

如图 32 所示，普通电容器的电极在短边侧，而 LW 逆转型的电极则相反，在长边侧。由于 L（长度）和 W（宽度）相反，故称“LW 逆转型”。是通过增加电极的宽度来降低 ESL 的类型。

三端电容是为了改善普通电容器（两个引脚）的频率特性而优化了结构的电容器。三端电容是将双引脚电容的一个引脚（电极）的另一端向外伸出作为直通引脚，将另一个引脚作为接地引脚。在上图中，输入输出电极相当于两端伸出的直通引脚，左右的电极当然是导通的。这种输入输出电极（直通引脚）和接地电极之间存在电介质，起到电容的作用。

将输入输出电极串联插入电源或信号线（将输入输出电极的一端连接输入端，另一端连接输出端），GND 电极接地。这样，由于输入输出电极的 ESL 不包括在接地端，因此接地的阻抗变得非常低。另外，输入输出电极的 ESL 通过在噪声路径直接插入，有利于降低噪声（增加插入损耗）。通过在长边侧成对配置接地电极，可抑制 ESL；再采用并联的方式，可使 ESL 减半。

基于这样的结构，三端电容不仅具有非常低的 ESL，而且可保持低 ESR，与相同容值相同尺寸的双引脚型电容相比，可显著改善高频特性。

3.5 去耦电容器的有效使用方法 注意事项

要想有效地使用去耦电容器，需要注意以下几点：

①高 Q 陶瓷电容器

电容器具有被称为“Q”的特性。图 33 表示 Q 和频率—阻抗特性之间的关系。

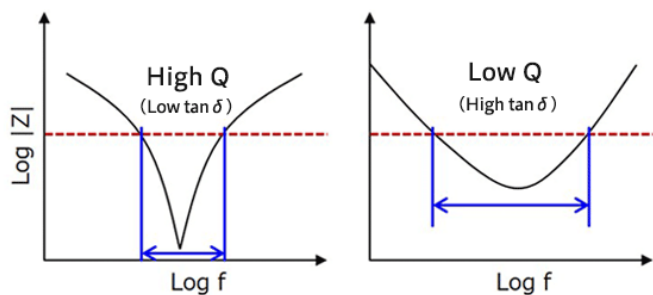


图 33. 电容器的 Q 值与频率—阻抗特性的关系

当 Q 值高时，阻抗在特定的窄带会变得非常低。当 Q 值低时，阻抗虽然不会极度下降，但可以在很宽的频段内降低。这种特性可能有助于符合某些 EMC 标准。例如，使用电容量变化较大的电容器时，如果 Q 值很高，则可能存在无法消除目标频率噪声的个体。在这种情况下，还有一种通过使用低 Q 电容器来抑制波动影响的手法。

②热风焊盘等的 PCB 图形

旨在提高安装时的散热性能的热风焊盘等的 PCB 图形，会使图形的电感分量增加。电感分量的增加会使谐振频率向低频端移动，所以有时可能无法获得理想的噪声消除效果。

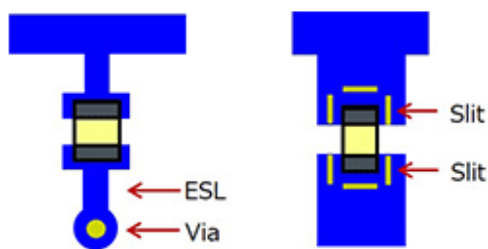


图 34. 散热等 PCB 图形导致的 ESL 增加

③探讨对策时的电容器试装

试制后需要对高频噪声采取对策，可以考虑增加小容量的电容器。此时，如图 35 中左侧示例所示，如果在大容量电容器上安装要增加的电容器，则纵向会增加额外的电感分量，因此不能充分发挥增加电容器的效果。在中间的示例中，虽然未违背“尽可能使小容量电容器靠近噪声源”的理论，但阻抗会与实际修改的 PCB 布局不同。最好的方法

是如右侧示例所示，以尽量接近实际修改的配置来探讨对策。

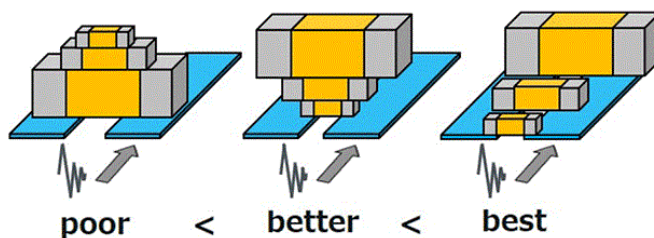


图 35. 探讨对策时的电容器试装

在探讨对策时，也可能会发生虽然噪声试验 OK，但安装到修改后的 PCB 时 NG 的现象，因此需要有意识地按照实际安装情况来探讨。

④电容器的电容量变化率

降噪用的电容器的电容量变化率较大时，谐振频率的波动会变大，目标消减频段会产生变化或波动，有时很难找到理想的降噪对策。尤其是需要在窄频段大幅消除噪声时，需要格外注意。表 2 表示实际的电容量和谐振频率相对于电容量变化率的关系。如果仔细查看这个表就可以看出，虽然视条件而定，不过很多情况是无法接受的。

电容量变化率 (%)	电容量 (pF)	谐振频率 (MHz)
+20	1,200	145
+10	1,100	152
±0	1,050	155
±0	1,000	159
-5	950	163
-10	900	168
-20	800	178

表 2. 电容量变化率、电容量及谐振频率 ※按照 L=1nH 计算

⑤电容器的温度特性

众所众知，电容器的特性会受温度影响。目前，EMC 测试的温度特性尚未标准化，但在某些应用中，不得不在明显的高温或低温条件/环境下工作、或在会产生较大温度变化

的条件/环境下使用。

在这类情况下，非常有可能发生“④电容量变化率”中提到的问题，所以，降噪用的电容器，需要尽量使用具有 CH、COG 特性的温度特性优异的产品。

3.6 去耦电容器的有效使用方法 小结

有效使用去耦电容器的方法总结如下：

●要点 1：使用多个去耦电容器

使用多个电容器去耦时，使用多个相同容值的电容器和交织使用不同容值的电容器时，效果是不同的。

■使用多个容值相同的电容器时

在整个频率范围内阻抗下降，可有效降低整体噪声。

■使用多个容值不同的电容器时

可降低更高频段的阻抗，可有效降低高频噪声。但是需要注意的是，有些频率会产生反谐振，阻抗反而增高，噪声反而恶化。

●要点 2：降低电容器的 ESL

如果容量相同，则 ESL 越低谐振频率越高，因此通过降低 ESL 可改善高频特性，从而可更有效地降低高频噪声。

■即使容值相同也要使用尺寸较小的电容器

ESL 取决于电容器引脚部位的结构，因此尺寸较小的电容器基本上引脚部位也较小，通常 ESL 较小。当需要降低更高频段的噪声时，方法之一是选择尺寸小的电容器。但是，要注意 DC 偏置特性。

■使用旨在降低 ESL 的电容器

积层陶瓷电容器中，有些型号采用的是旨在降低 ESL 的形状和结构，比如 LW 逆转型电容、三端电容。

●去耦电容器的有效使用方法：其他注意事项

■高 Q 陶瓷电容器

当 Q 值高时，阻抗在特定的窄频段会非常低。当 Q 值

低时，阻抗虽然不会极度下降，但可以在较宽的频段内降低。

■热风焊盘等的 PCB 图形

旨在提高安装时的散热性的热风焊盘等 PCB 图形，会使图形的电感分量增加，因此会使谐振频率向低频端移动，所以有时可能无法获得理想的噪声消除效果。

■探讨对策时的电容器试装

为了降低高频噪声而增加小容量电容器时，要基于“尽可能使小容量电容器靠近噪声源”的理论，以尽量接近实际修改的配置来探讨对策。探讨时如果和修改后的配置不同，阻抗也会不同，很可能无法获得评估时的效果。

■电容器的电容量变化率

降噪用的电容器的电容量变化率较大时，谐振频率的波动会变大，目标消减频段会产生变化或波动，有时很难找到理想的降噪对策。尤其是需要在窄频段大幅消除噪声时，需要格外注意。

■电容器的温度特性

电容器的特性会受温度影响，因此，在明显的高温、低温、较大温度变化的条件/环境下使用的应用产品，需要采用温度特性优异的电容器。

4. 使用电感降低噪声

继电容器之后，本章将介绍使用第二重要的降噪部件—电感和相关部件—铁氧体磁珠来降低噪声的对策。

仅使用电容器无法充分消除噪声时，可以考虑使用电感或铁氧体磁珠。

4.1 电感的频率特性

首先，与电容器部分一样，先来简单回顾一下电感的频率特性。

电感（线圈）具有以下基本特性，称之为“电感的感性电抗”

- ①直流基本上直接流过。
- ②具有交流阻抗。
- ③频率越高越难通过。

图 36 是表示电感的频率和阻抗特性的示意图。

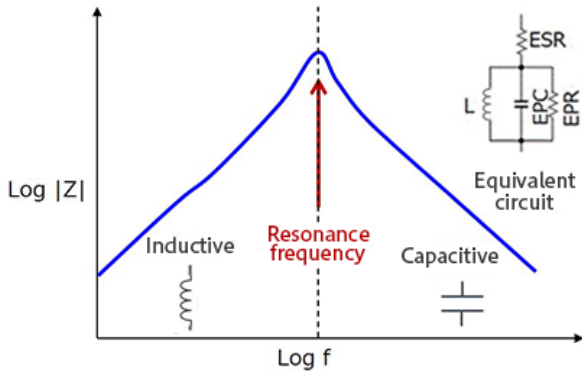


图 36. 电感的频率特性

在理想电感器中，阻抗随着频率的提高而呈线性增加，但在实际的电感器中，如等效电路所示，并联存在寄生电容 EPC，因而会产生自谐振现象。

所以，到谐振频率之前呈现电感本来的感性特性（阻抗随着频率升高而增加），但谐振频率之后寄生电容的影响占主导地位，呈现出容性特性（阻抗随着频率升高而减小）。也就是说，在比谐振频率高的频率范围，不发挥作为电感的作用。

电感的谐振频率可通过以下公式求得。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times EPC}}$$

除了主体是电容量还是电感量的区别外，该公式与电容器的谐振频率公式基本相同。从公式中可以看出，电感值 L 变小时谐振频率会升高。

电感的寄生分量中，除了寄生电容 EPC 之外，还有电感绕组的电阻分量 ESR（等效串联电阻）、与电容并联存在的 EPR（等效并联电阻）。电阻分量会限制谐振点的阻抗。

<小结>

- 电感在谐振频率之前呈现感性特性（阻抗随频率升高而增加）。
- 电感在谐振频率之后呈现容性特性（阻抗随频率升高而减小）。
- 在比谐振频率高的频段，电感不发挥作为电感的作用。
- 电感值 L 变小时，电感的谐振频率会升高。
- 电感的谐振点阻抗受寄生电阻分量的限制。

4.2 使用电感减低噪声

用于降噪的电感主要是绕线型的，基本上用来构成π型滤波器。π型滤波器在低频段通过电感和电容发挥低通滤波器的作用。然而，到了高频段，由于电感会变为电容、电容会表现为电感，从而使π型滤波器起到高通滤波器的作用，因此无法获得噪声消除效果。（图 37、38、39）。

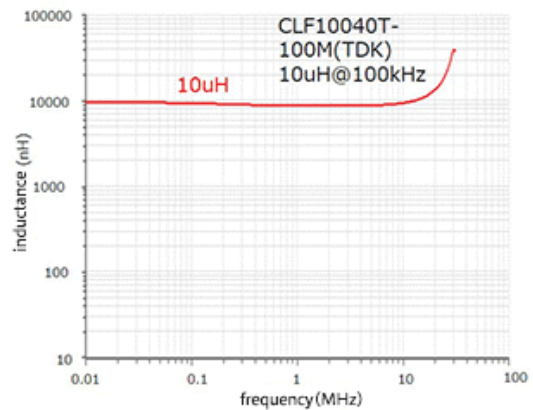


图 37. 电感的电感值和频率特性

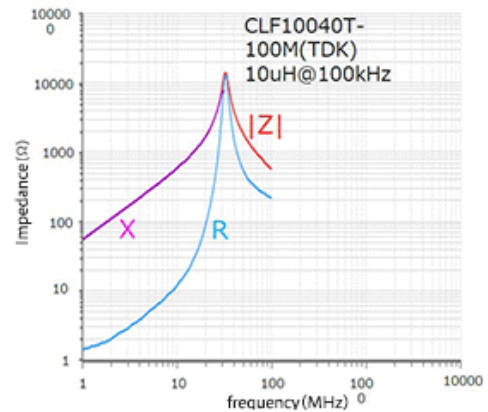


图 38. 电感的阻抗和频率特性

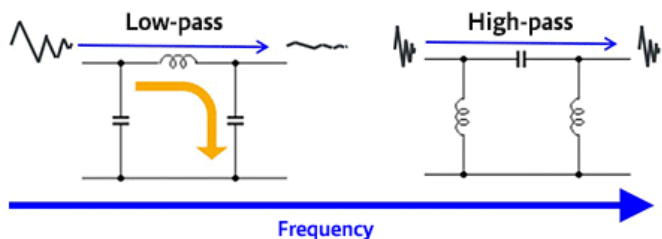


图 39. π 型滤波器在高频时变成高通滤波器，无法获得降噪效果

4.3 使用铁氧体磁珠降低噪声

首先，通过与电感进行比较来了解铁氧体磁珠的基本特性。虽然铁氧体磁珠被归类为电感，但其频率-阻抗特性与普通电感不同（图 40 和图 41）。

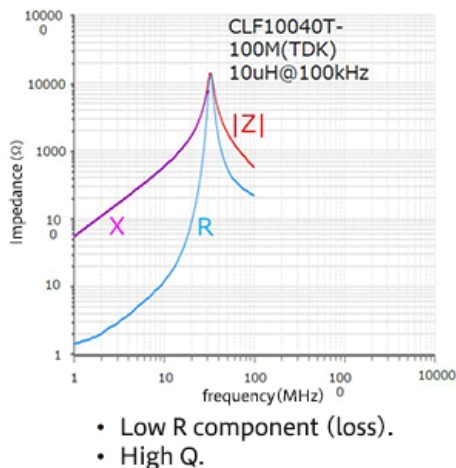


图 40. 电感的阻抗特性

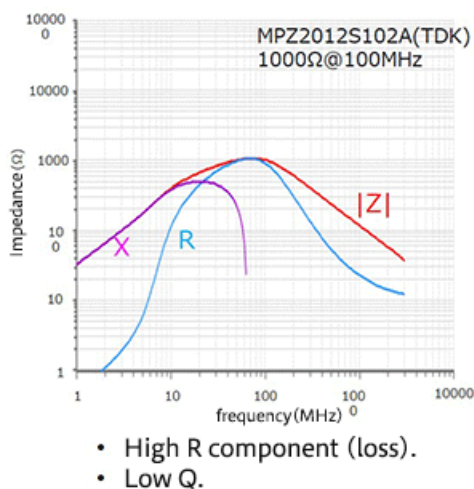


图 41. 铁氧体磁珠的阻抗特性

铁氧体磁珠与普通电感相比，具有电阻分量 R 较大、Q 值较低的特性。利用该特性可消除噪声。

另外，直流电流特性也不同（图 42 和图 43）。

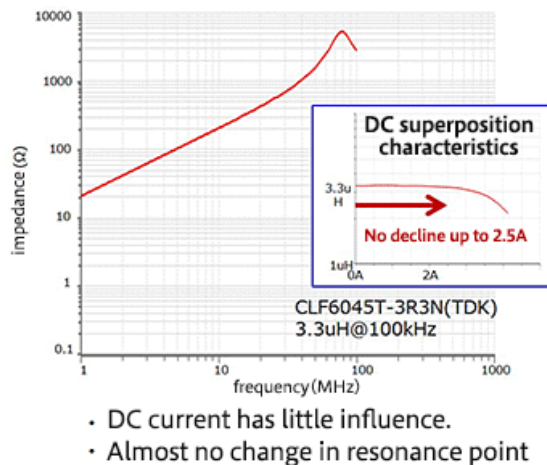


图 42. 电感的阻抗特性和直流叠加特性

普通的电感可容许较大的直流叠加电流，只要在其范围内，阻抗不怎么受直流电流的影响，谐振点也几乎不变。相比之下，铁氧体磁珠对于直流电流容易饱和，饱和会导致电感值下降，谐振点向高频段转移。这会导致滤波器特性变化，因此需要特别注意。

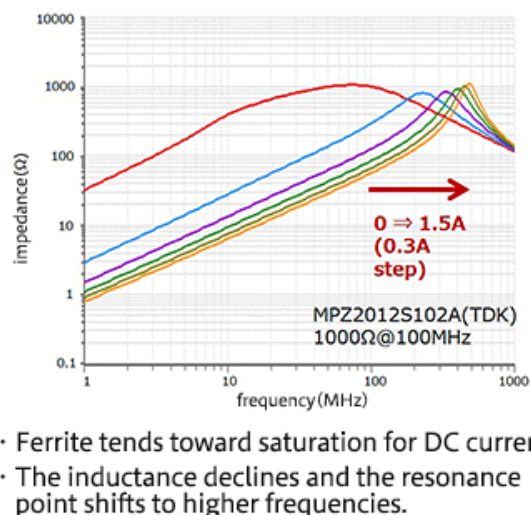


图 43. 铁氧体磁珠的阻抗特性和直流叠加特性

下面将根据铁氧体磁珠的这些特性，来介绍使用铁氧体磁珠降低噪声的对策。

电感通过组成滤波器来消除噪声，而铁氧体磁珠则通过将噪声转变为热来消除噪声。这是一个很大的不同点，不过铁氧体磁珠在低频段基本上也起到低通滤波器的作用。但是，如前所述，在这个频段对于直流电流容易饱和，电感值下降，并且谐振点向高频段移动，因此很难消除目标频段的噪声（图 44）。

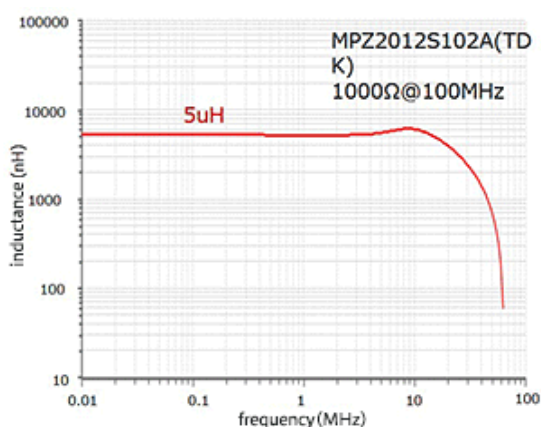


图 44. 铁氧体磁珠的电感频率特性

请看图 45 中的曲线。电抗降低并存在与电阻分量交叉的点。当超过这个被称为“交越点”的频段后，铁氧体磁珠将起到电阻的作用，具有将噪声转变为热的功能。这是与内置绕线型电感的滤波器之间的巨大差异。而在更高频段，则与绕线型电感相同，发挥高通滤波器的作用（图 46）。

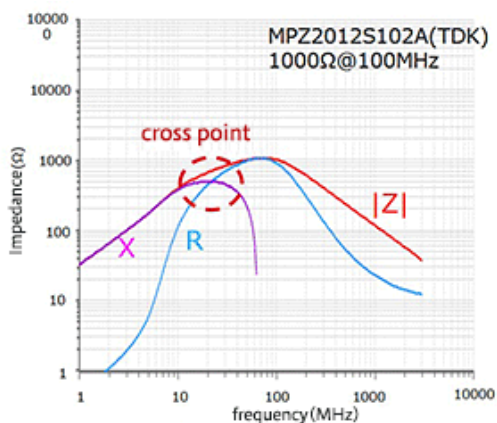


图 45. 铁氧体磁珠的频率特性和交越点

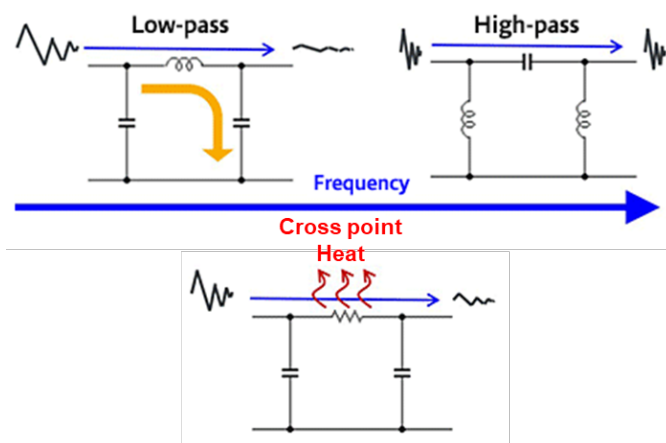


图 46. 铁氧体磁珠的除噪动作

使用了铁氧体磁珠的滤波器，不仅可将噪声旁路消除，还可将噪声转变为热，因此有望实现优异的噪声消除性能。但是，需要注意其直流偏置电流特性。

4.4 使用共模滤波器降低噪声

从严格意义上讲，共模滤波器并不是电感器，而是磁性器件，是降噪对策中的重要部件。

共模滤波器的结构是两个绕组绕在一个磁芯上，相当于两个电感组合在一起（图 47）。当绕组中流过电流时，磁芯产生磁通，针对急剧的电流变化，起到使电流不易流通（扼流）的作用。这与电感的自感作用相同。

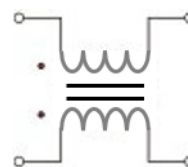


图 47. 共模滤波器的结构示意图

共模滤波器基本上起到“共模电流不流通、差模电流流通”的作用。关键在于这两根导线沿同一方向绕在一个磁芯上。

差模电流是在两根导线上往复流动，因此磁芯产生的磁通方向相反，磁通抵消，因此不能起到扼流作用，而是直接通过（图 48）。

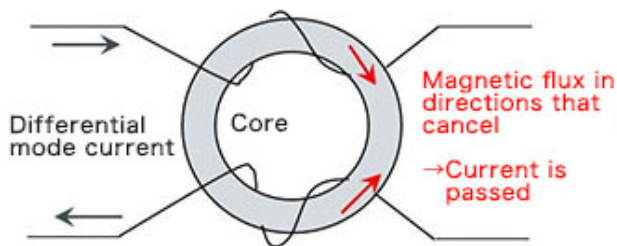


图 48. 共模滤波器的差模电流

相比之下，共模电流的流向相同，因此磁通量增强，电流不易流过。也就是说，共模电流=共模噪声难以通过，被滤除（图 49）。

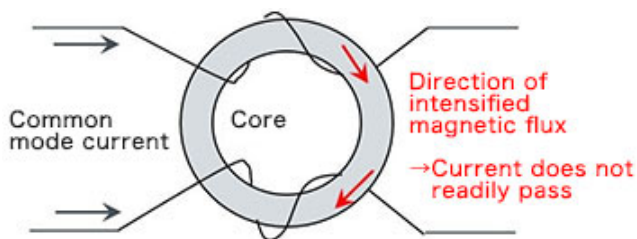


图 49. 相对于共模滤波器的共模电流

下面是作为开关电源的输入滤波器使用的示例。

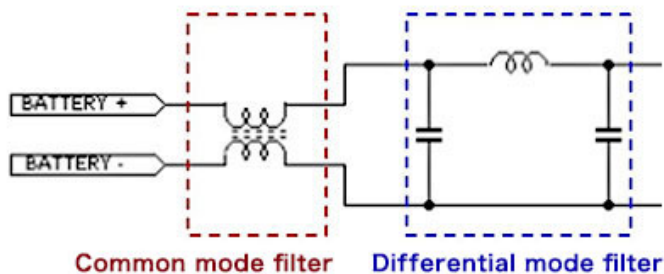


图 50. 开关电源的输入滤波器示例

将共模滤波器插入电源输入线路中，如图 50 所示。与用于信号线的共模滤波器相比，用于电源线的共模滤波器使用差模阻抗较大的分裂绕组结构的。这些产品一般作为电源线用共模滤波器推出，其差模噪声消减效果也值得期待。但是，由于几百 k~几 MHz 左右的差模阻抗非常低，因此一般与 π 型滤波器等差模噪声用的滤波器并用。

4.5 使用电感降低噪声 注意事项

当使用电感或铁氧体磁珠组成滤波器时，某些部件配置和电路板布线图案布局方案，不仅不能获得足够的噪声去除效果，反而还可能导致噪声耦合，使情况更加恶化。作为电路板布局相关的注意事项，下面介绍串扰和地线反弹噪声。

●串扰

串扰是因电路板布线间的杂散电容和互感，噪声与相邻的其他电路板布线耦合，这在“1.5 什么是串扰”中已经介绍过。下面是 LC 滤波器的图形布局和部件配置带来的串扰及其对策示例。

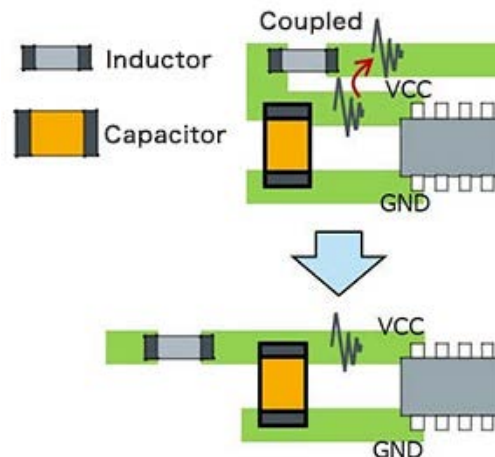


图 51. 电路板布局引起的串扰示例

在图 51 上方的布局示例中，VCC 线路中有 LC 滤波器，滤波器后的布线与含有滤波器前的噪声的布线相邻，因此噪声因串扰而耦合，滤波效果下降。下方为对策示例，采用了不与含有噪声的线路相邻的布局，从而可将噪声耦合控制在最低限度内。

●地线反弹噪声

从图 52 的示例中可以看出，在组成 π 型滤波器的电感前后所配置的电容器，其某些接地方式可能会带来地线反弹噪声。

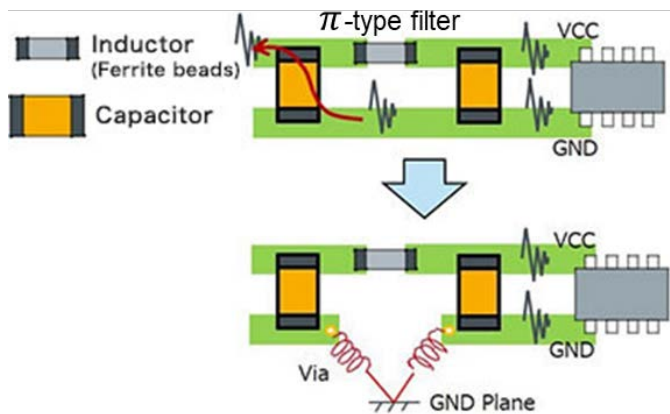


图 52. 电路板布局引起的接地反弹示例

在图 52 示例中，如箭头所示，来自接地线的噪声经由电容回流，并去到了滤波器外面。

在这种情况下，为了避免噪声直接传播，可利用过孔（Via）的寄生电感的手法，经由过孔（Via）与接地平面连接，改善效果较好。

在开关电源电路中，PCB 布局是非常重要的。在 Tech Web 的“[DC/DC 转换器的 PCB 板布局](#)”中，介绍了 PCB 布局的基础内容，请参阅。

4.6 使用电感降低噪声 小结

本节是使用电感、铁氧体磁珠和共模滤波器降低噪声的对策小结。

●使用电感降低噪声

仅用电容器无法充分消除噪声时，可考虑使用由电感组成的滤波器。

■由绕线型电感构成滤波器

- 普通电感构成的滤波器，可选电感值的范围较宽。
- 由电感构成的 π 型滤波器，在低频段，通过电感和电容发挥低通滤波器的作用。
- 到了高频段，由于电感会表现为电容、电容会表现为电感，从而 π 型滤波器起到高通滤波器的作用，因此无法获得噪声消除效果。

●使用铁氧体磁珠降低噪声

使用了铁氧体磁珠的滤波器，不仅可将噪声旁路消除，还可将噪声转变为热，因此有望实现优异的噪声消除性能。

■铁氧体磁珠的阻抗特性

- 虽然铁氧体磁珠被归类为电感，但其频率—阻抗特性与普通电感不同。
- 铁氧体磁珠与普通电感相比，具有电阻分量 R 较大、 Q 值较低的特性，因此可利用该特性消除噪声。
- 普通的电感可容许较大的直流叠加电流，只要在其范围内，阻抗不怎么受直流电流的影响。
- 请注意，铁氧体磁珠对于直流电流容易饱和，饱和会导致电感值下降，谐振点向高频段转移，滤波特性产生变化。

■铁氧体磁珠将噪声转变为热

- 铁氧体磁珠的 Q 值较低，因此在较宽频率范围内具有有效的降噪效果。
- 铁氧体磁珠在低频段基本上发挥低通滤波器的作用，在这个频段，对于直流电流容易饱和，因此使用这种电感值下降的铁氧体磁珠很难消除目标频段的噪声。
- 当电抗下降且越过与电阻分量的交点时，铁氧体磁珠发挥电阻的作用，可将噪声转变为热。
- 使用了铁氧体磁珠的滤波器，不仅可将噪声旁路消除，还可将噪声转变为热，因此有望实现优异的噪声消除性能。
- 发挥电阻功能且将噪声转变为热，是与使用绕线型电感的滤波器之间的巨大差异。
- 在更高频段，则与绕线型电感相同，发挥高通滤波器的作用。

●使用共模滤波器降低噪声

共模滤波器对于消除共模噪声来说是必不可少的配置。

■什么是共模滤波器

- 从严格意义上讲，共模滤波器并不是电感器，但在降噪对策中它是重要的磁性器件。
- 共模滤波器的结构是两个绕组绕在一个磁芯上，相当于两个电感组合。
- 共模滤波器是利用自感作用来阻止共模电流通过（斩波），从而消除共模噪声。
- 共模电流不流通、差模电流流通。

■通过共模滤波器消除共模噪声

- 作为开关电源的输入滤波器使用时，要使用差模阻抗较大的分裂绕组结构的共模滤波器。
- 这种滤波器一般作为电源线用共模滤波器销售。
- 虽然其差模噪声消除效果也值得期待，但是由于几百 k~几 MHz 左右的差模阻抗非常低，因此一般与 π 型滤波器等差模噪声用的滤波器并用。

●注意事项

■串扰

- 有些 PCB 板布线布局，会因串扰而导致滤波效果下降。
- 串扰是因电路板布线间的杂散电容和互感，噪声与相邻的其他电路板布线耦合。
- 滤波器后的布线与含有滤波器前的噪声的布线相邻时，噪声因串扰而耦合，滤波效果下降。
- 作为对策，采用不与含有噪声的线路相邻的布局，可将噪声耦合控制在最低限度内。

■地线反弹噪声

- 在组成 π 型滤波器的电感前后所配置的电容器，其某些接地方式可能会带来地线反弹噪声。
- 为了避免噪声直接传播，作为对策，可利用过孔 (Via) 的寄生电感的手法，经由过孔 (Via) 与接地平面连接，改善效果较好。

5. 其他降噪对策

作为开关电源的降噪对策，前面探讨了使用电容器和电感的方法特点和注意事项，还有其他一些降噪的对策方法。下面介绍其中经常用到的 RC 缓冲电路。

5.1 RC 缓冲电路

为了降低开关节点产生的尖峰电压，可考虑增加 RC 缓冲电路。在图 53 的示例中，整流二极管 OFF (高边开关 ON) 时，RC 缓冲电路可将二极管的接合部、寄生电感、寄生电容、PCB 版图的电感中积蓄的电荷放电，并通过电阻转换为热，从而降低尖峰电压 (图 54)。

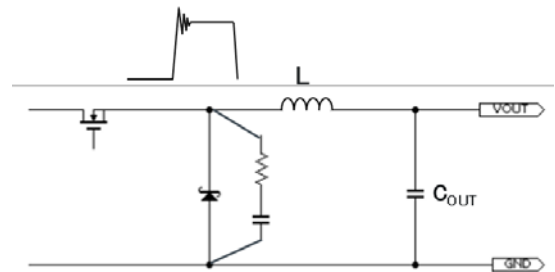


图 53. 将 RC 缓冲电路添加到开关节点

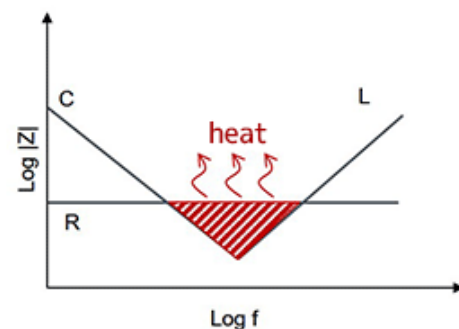


图 54. RC 缓冲电路将噪声转变为热

RC 的值通常以 $R=2\Omega$ 、 $C=470\text{pF}$ 左右为出发点，通过实际确认来找出最佳值。

需要注意的是，增加缓冲电路会导致开关转换变慢，效率下降，所以需要探讨噪声水平和效率之间的平衡点。

另外，前提是电阻将噪声电压转换为热，所以需要注意电阻的容许损耗。电阻的损耗可通过以下公式计算出来。

$$\text{损耗} = C \times \text{VIN}^2 \times \text{fsw}$$

缓冲电路不仅可用于低边侧，在高边侧也经常使用。

<小结>

- RC 缓冲电路可通过电阻将寄生电容、寄生电感等产生的尖峰电压转换为热，从而降低尖峰电压。
- 增加缓冲电路可能会导致效率降低，因此需要探讨噪声水平和效率之间的平衡点。
- 电阻是将噪声电压转换为热，因此需要注意电阻的容许损耗。

6. 总结

我们从“EMC 基础”开始，以开关电源为前提分别介绍了“降噪对策（步骤与概要）”、“使用电容器降低噪声”、“使用电感（包括铁氧体磁珠和共模滤波器）降低噪声”、“其他降噪对策”相关的基础内容。

如本书开头所述，噪声不仅与产品性能有关，而且还是满足相应国际法律法规要求的重要考虑因素。关于电源，由于全球节能要求和法律法规的要求，使用高效率的开关电源是必然趋势，并且开关电源的噪声也是必须要解决的问题。

要想采取措施降低噪声，最重要的是从开发初期就始终有意识地考虑到噪声问题。除了本书中介绍的有关电路方面的对策外，还有一些旨在符合标准要求的噪声控制方法，例如屏蔽措施和展频措施。但是，请记住，抗噪声干扰和不发出噪声的设计是根本。

修订记录

日期	版本	变更内容
2020.1.07	001	初版

注意事项

- 1) 本资料中的内容可能会有优化，如有变更，恕不另行通知。
- 2) 本资料中的应用电路示例及其常数等信息，是用来对本产品的标准工作和使用方法进行说明的。在进行量产设计时，请对外部各种条件进行充分考量。
- 3) 本资料中的技术信息用来说明产品的代表性工作以及应用电路示例等内容，并非明示或默示允许实施或使用 ROHM 或其他公司的知识产权以及其他所有权利。对于因使用上述技术信息而引起的任何纠纷，ROHM 公司概不负责。
- 4) 对于因不遵守本资料中的记载而引起的任何事故或损坏，ROHM 公司概不负责。
- 5) 本资料在编写过程中已经力求信息准确，但万一因信息错误或误排而造成任何损害，ROHM 公司概不负责。
- 6) 未经 ROHM 许可，严禁复制或转载本资料的全部或部分内容。