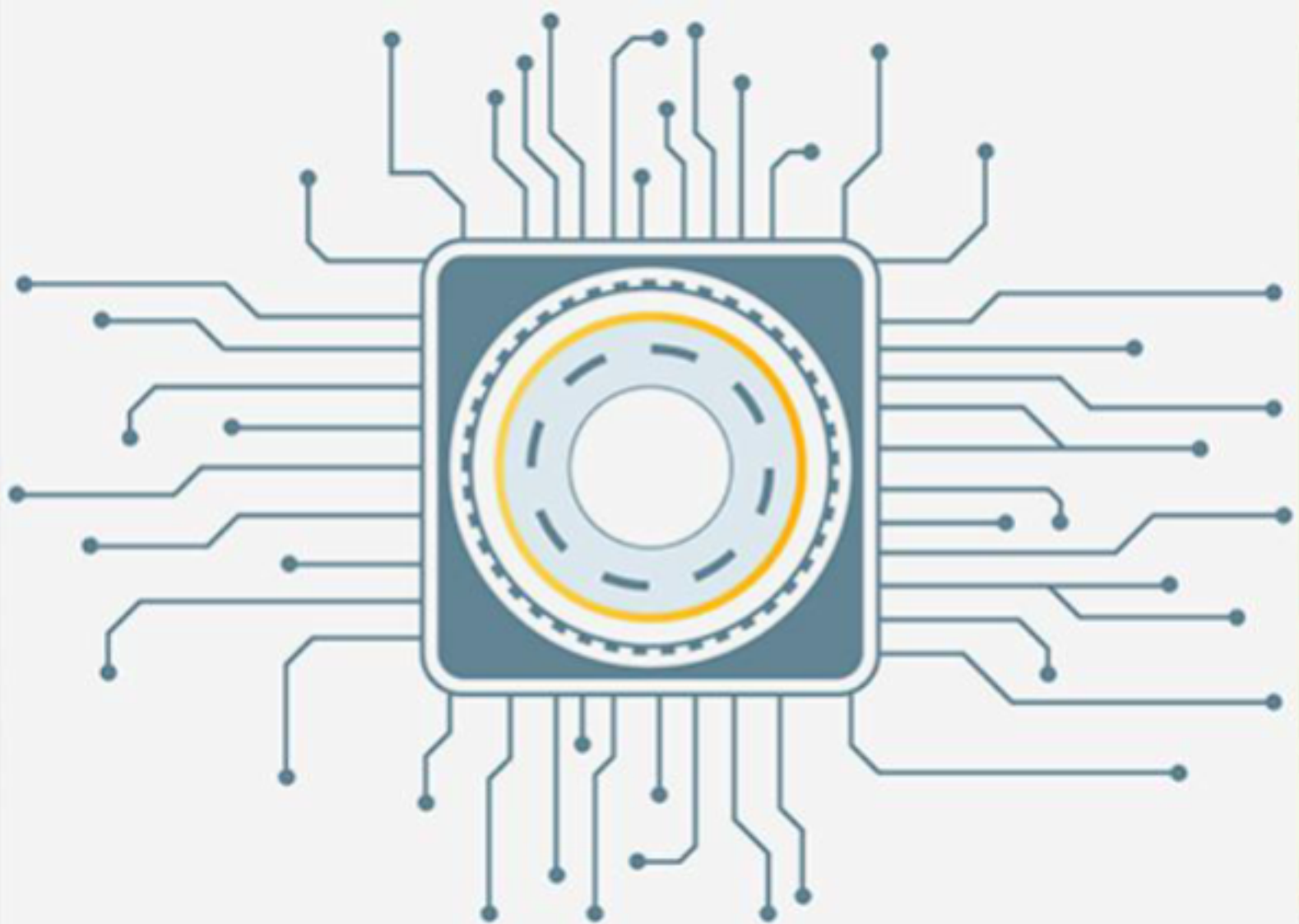




开关电源噪声—EMC



目 录

第八章 如何使用电容器降低噪声.....	1
前言.....	1
使用电容器降低噪声.....	1
电容的频率特性.....	2
去耦电容的有效使用方法.....	4
总结.....	11
第九章 如何使用电感来降低噪声.....	13
电感的频率特性.....	13
使用电感和铁氧体磁珠降低噪声的方法.....	14
使用共模滤波器降低噪声的方法.....	17
串扰、GND 线反弹噪声.....	18
使用电感的降噪方法总结.....	19
第十章 其他降噪方法.....	23
RC 缓冲电路.....	23
第十一章 EMC 总结.....	24



第八章 如何使用电容器降低噪声

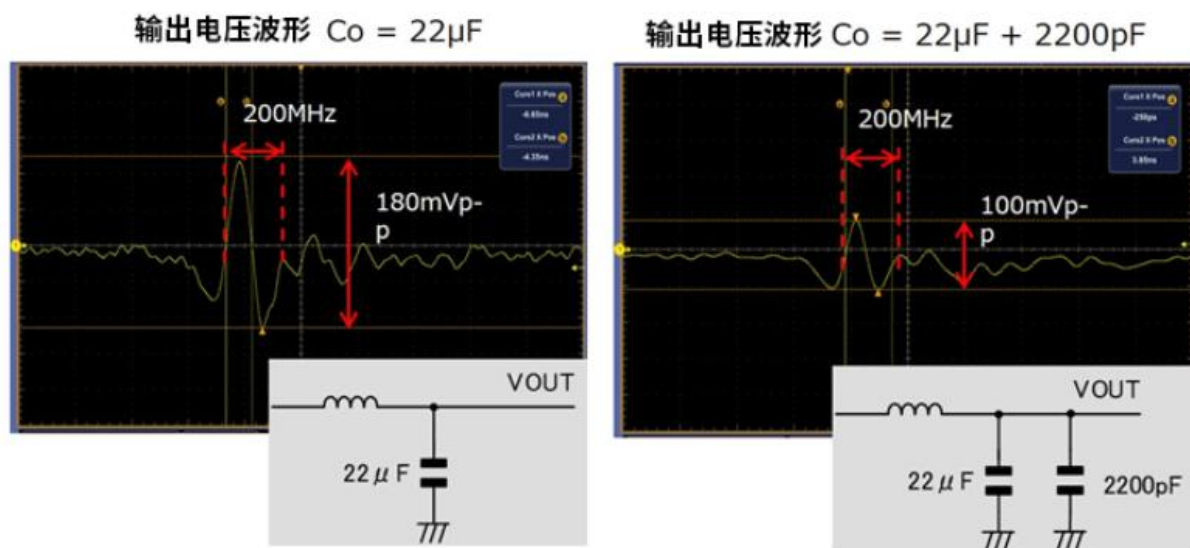
前言

《开关电源噪声—EMC（上）》中，介绍了 EMC 相关的基础知识，然后再探讨噪声方法相关的内容。从本章节开始将实操如何降低噪声，为大家介绍如何使用电容器降低噪声，使用电感降低噪声。

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，噪声方法（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。

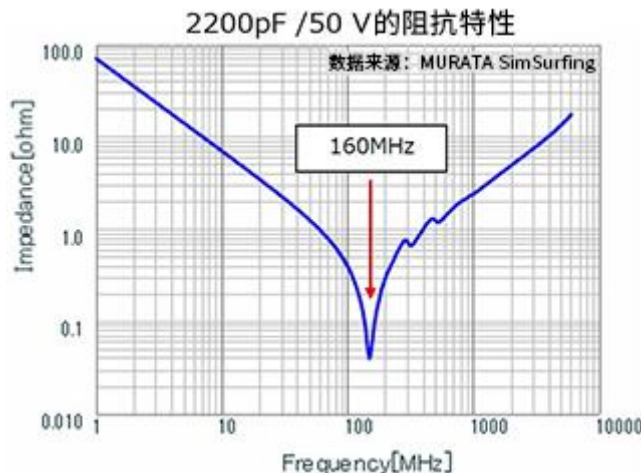
使用电容器降低噪声的示意图，下面是通过添加电容器来降低 DC/DC 转换器输出电压噪声的示例。



左侧的波形是输出端 LC 滤波器的电容为 $22\mu\text{F}$ 时，在约 200MHz 的频率范围存在 180mVp-p 左右的噪声（振铃、反射）。右侧波形是为了降低这种噪声而添加了 2200pF 电容后的结果。从波形图可以看出，添加 2200pF 的电容使噪声降低了 100mV 左右。



这里应该思考的是“为什么是 200pF ”。下图为所添加电容器的阻抗频率特性。



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 2MHz 。

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。

要点

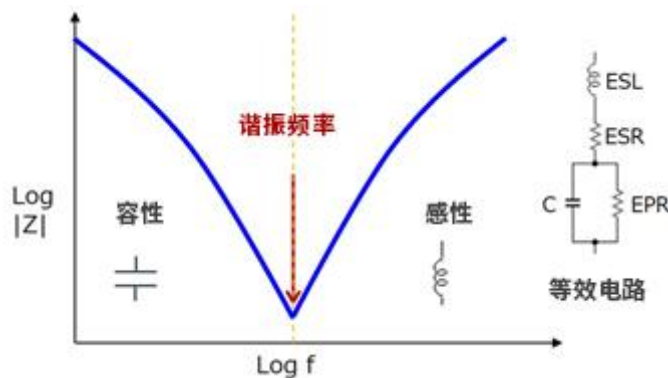
1. 通过降低目标噪声频率的阻抗来降低噪声幅度。
2. 降噪用电容器的选型需要根据阻抗的频率特性进行（而非容值）。

电容的频率特性

接下来将对其中使用电容和电感降噪的方法进行介绍，这也可以称为“噪声方法的基础”。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。

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。下图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。

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 或电极间有漏电流的具有相同的意义。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。

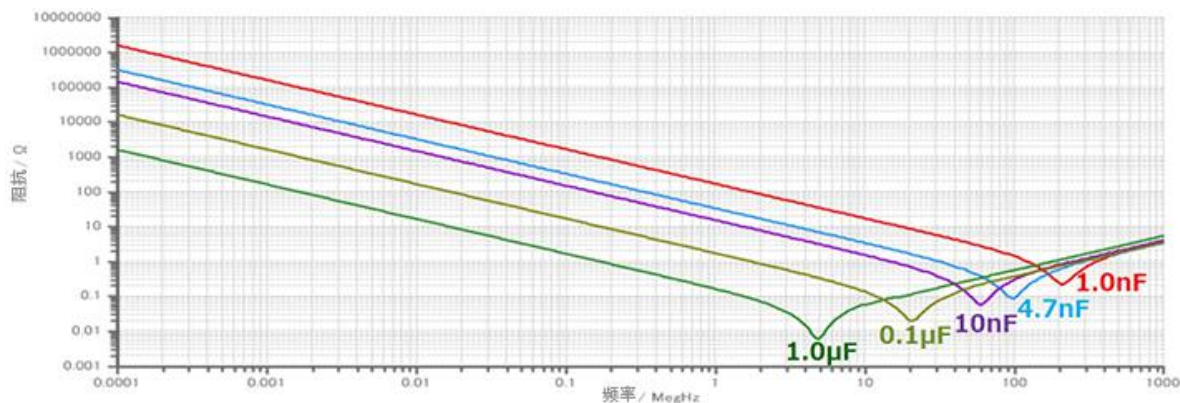
谐振频率可通过以下公式计算：

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

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方法，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、电源线旁路到 GND 等。

下图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。





下面总结一下电容器阻抗的频率特性：

1. 容值和 ESL 越小，谐振频率越高，高频区域的阻抗越低。
2. 容值越大，容性区域的阻抗越低。
3. ESR 越小，谐振频率的阻抗越低。
4. ESL 越小，感性区域的阻抗越低。

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）。

选择降噪用电容器时，确认频率特性需要意识到连接的是 LC 的串联谐振电路（而非电容）。

要点

- 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。

去耦电容的有效使用方法

去耦电容有效使用方法的要点大致可以分为以下两种。另外，还有其他几点需要注意。本文就以下三点中的“要点 1”进行介绍。

要点 1：使用多个去耦电容

要点 2：降低电容的 ESL（等效串联电感）

其他注意事项

使用多个去耦电容

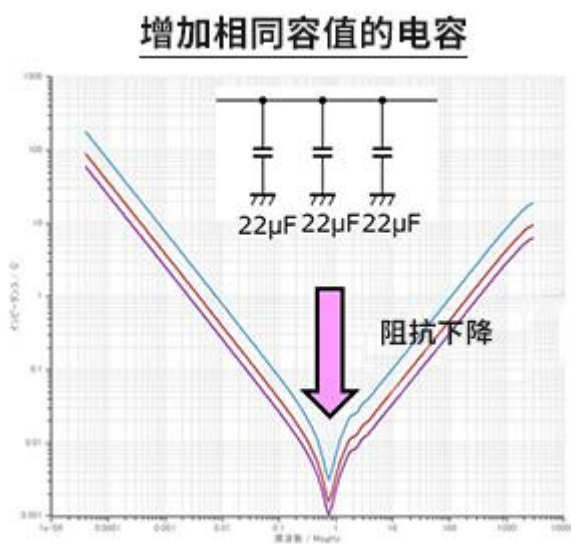
去耦电容的有效使用方法之一是用多个（而非 1 个）电容进行去耦。使用多个电容



时，使用相同容值的电容时和交织使用不同容值的电容时，效果是不同的。

1. 使用多个容值相同的电容时

下图是使用 1 个 22 μ F 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。



如图所示，当增加容值相同的电容后，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 66 μ F，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，因此为 $\frac{1}{ESR_1} + \frac{1}{ESR_2} + \frac{1}{ESR_3}$ ，假设 3 个电容的 ESL 全部相同，则 ESL 减少至 1/3，阻抗也下降。

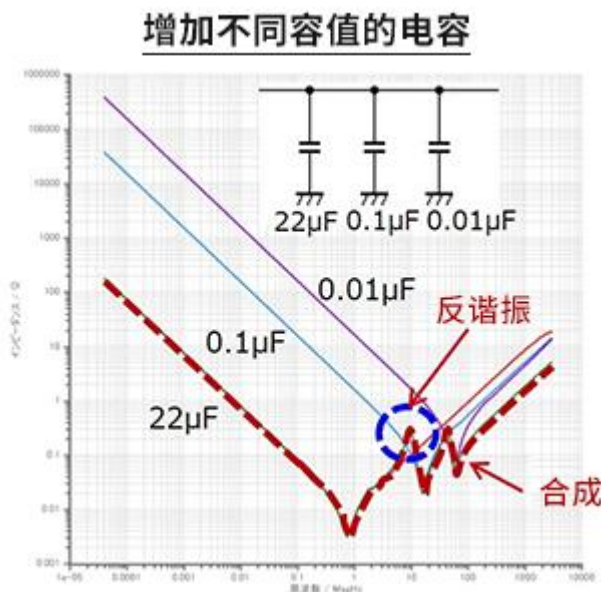
由此可知，通过使用多个相同容值的电容，可在整个频率范围降低阻抗，因此可进一步降低噪声。

2. 使用多个容值不同的电容时



这些曲线是在 $22\mu\text{F}$ 的电容基础上并联增加 $0.1\mu\text{F}$ 、以及 $0.01\mu\text{F}$ 的电容后的频率特性。

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 $22\mu\text{F}$ 电容的频率特性来说， $0.1\mu\text{F}$ 和 $0.01\mu\text{F}$ 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叉点。

所增加电容的电容量，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。在实际的噪声方法中，需要考虑寄生分量的影响。

要点：

1. 去耦电容的有效使用方法有两个要点：①使用多个电容，②降低电容的 ESL。
2. 使用多个电容时，容值相同时和不同时的效果不同。

降低电容的 ESL

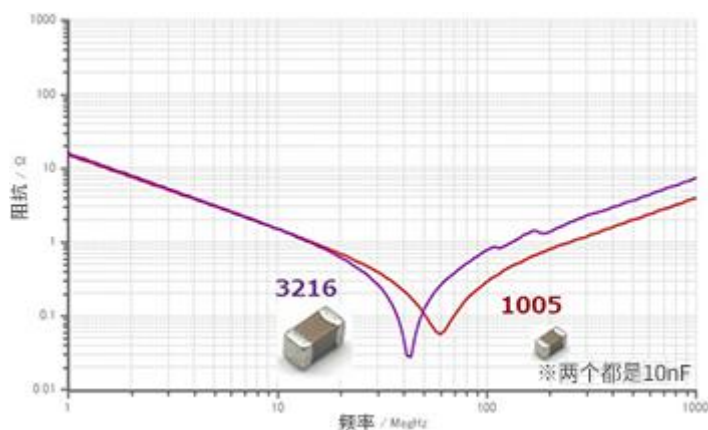
去耦电容的有效使用方法的第二个要点是降低电容的 ESL（即等效串联电感）。虽说是“降低 ESL”，但由于无法改变单个产品的 ESL 本身，因此这里是指“即使容值相同，也要使用 ESL 小的电容”。通过降低 ESL，可改善高频特性，并可更有效地降低高频噪声。



1. 即使容值相同也要使用尺寸较小的电容

对于积层陶瓷电容（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。尺寸较小的电容基本上引脚部位也较小，通常 ESL 较小。

下图是容值相同、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“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，从公式中可见，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。

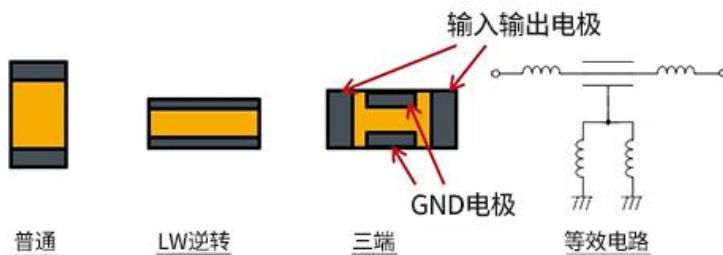


$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C \times ESL}}$$

关于噪声方法，当需要降低更高频段的噪声时，可以选择尺寸小的电容。

2. 使用旨在降低 ESL 的电容

积层陶瓷电容中，有些型号采用的是旨在降低 ESL 的形状和结构。



如图所示，普通电容的电极在短边侧，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（两个引脚）的频率特性而优化了结构的电容。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 GND 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 GND 电极间存在电介质，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 GND 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。

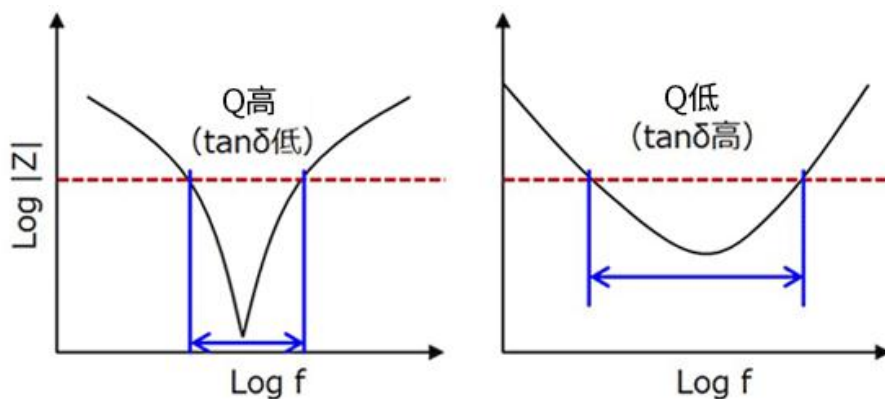
要点：

1. 去耦电容的有效使用方法有两个要点：①使用多个电容，②降低电容的 ESL。
2. 通过降低电容的 ESL，可改善高频特性，并可更有效地降低高频噪声。
3. 有的电容虽然容值相同，但因尺寸和结构不同而 ESL 更小。

其他注意事项

①Q 较高的陶瓷电容

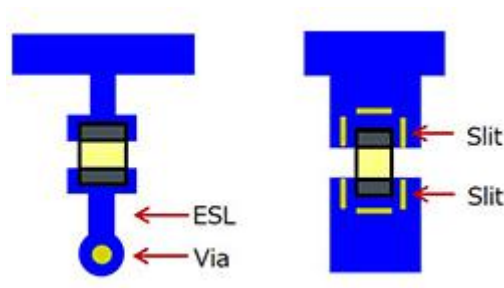
电容具有被称为“Q”的特性。下图即表示 Q 和频率—阻抗特性之间的关系。



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，还有一种通过使用具有低 Q 的电容来抑制波动影响的手法。

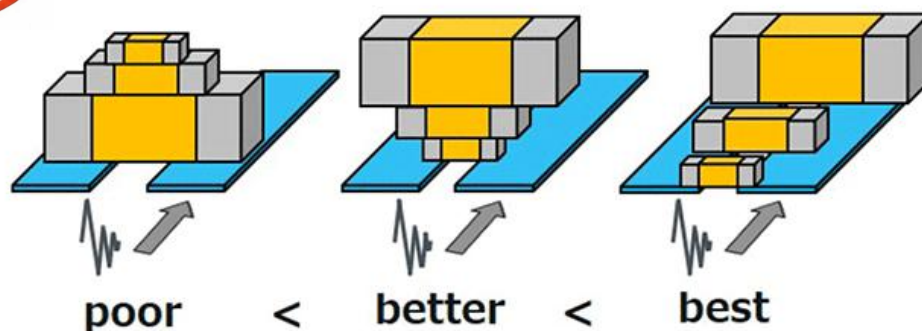
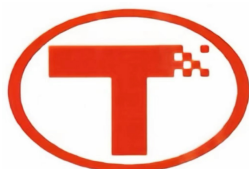
②热风焊盘等的 PCB 图形

旨在提高散热性的热风焊盘等的 PCB 图形，图形的电感分量会增加。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。



③探讨方法时的电容试装

试制后需要对高频噪声采取方法，可以考虑增加小容量的电容器。此时，如下图所示，如果在大容量电容器上安装要增加的电容器（左例），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。在中间的例子中，虽然未违背“尽可能使小容量电容靠近噪声源”的理论，但阻抗会与实际修改的 PCB 布局不同。最好的方法是以尽量接近实际修改的配置进行探讨（右例）。



在探讨方法时，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，因此需要在探讨时就有意识地按照实际来安装。

④电容的电容量变化率

噪声方法用的电容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噪声方法。尤其是需要在窄频段大幅消除噪声时，需要格外注意。下表表示电容量变化率和实际的电容量和谐振频率之间的关系。仔细看这个表的话可以看出，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
+5	1,050	155
±0	1,000	159
-5	950	163
-10	900	168
-20	800	178

※ 按 $L=1nH$ 计算

⑤电容器的温度特性

众所周知，电容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，用于噪声方法的电容，需要尽量使用具有 CH、COG 特性的温度特性优异的产品。



要点:

1. 理解 Q 与频率—阻抗特性之间的关系，并根据目的区分 Q 的差异。
2. 高 Q 电容窄带阻抗急剧下降。低 Q 电容在较宽频段相对平缓下降。
3. PCB 图形的热风焊盘等会增加电感分量，使谐振频率向低频端移动。
4. 探讨方法时的试装，如果不按照现实的修改实际安装，很可能在修改后的 PCB 板上无法获得探讨时的效果。
5. 电容量变化率大时，谐振频率会变化，无法获得目标频率理想的噪声消除效果。
6. 在温度条件和变动较大的严苛应用中，可以探讨使用具有 CH、COG 特性的温度特性优异的电容。

总结

前面分三次对“去耦电容的有效使用方法”进行了介绍。利用电容来降低噪声是非常重要的，所以在这里总结一下。

1. 使用多个去耦电容

使用多个电容去耦时，使用多个相同容值的电容和交织使用不同容值的电容时，效果是不同的。

使用多个相同容值的电容时，在整个频率范围内阻抗下降，可有效降低整体噪声。

使用多个不同容值的电容时，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。

2. 降低电容的 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：ESL 取决于电容引脚部位的结构，因此尺寸较小的电容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。但是，要注意 DC 偏置特性。

使用旨在降低 ESL 的电容：积层陶瓷电容中，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。

3. 其他注意事项

Q 较高的陶瓷电容：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，但可以在较宽的频段内降低。

热风焊盘等的 PCB 图形：旨在提高散热性的热风焊盘等的 PCB 图形，图形的电感分量会增加，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。

探讨方法时的电容试装：增加小容量电容以降低高频噪声时，要基于“尽可能使小容量电容靠近噪声源”的理论，以尽量接近实际修改的配置进行探讨。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。

电容的电容量变化率：噪声方法用的电容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噪声方法。尤其是在窄频段大幅消除噪声时，需要格外注意。

电容的温度特性：电容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，需要采用温度特性优异的电容。



第九章 如何使用电感来降低噪声

本章开始介绍“使用电感降低噪声的方法”。在这里首先来介绍下什么是电感的频率特性。

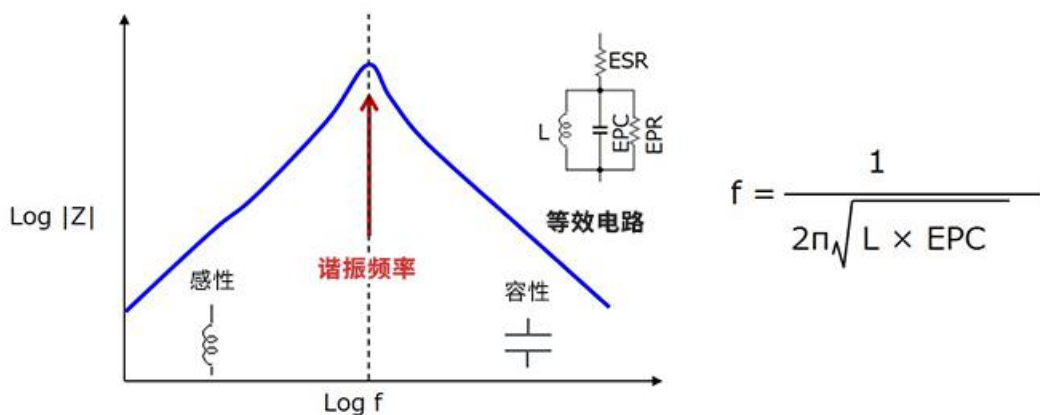
电感的频率特性

在进入具体的电感降噪方法解说之前，与介绍“使用电容器降低噪声”时一样，先来简单回顾一下电感的频率特性。

首先，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对于交流，起到类似电阻的作用。
- ③频率越高越难通过。

下面是表示电感的频率和阻抗特性的示意图。



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上述公式求得。除了主体是电容量还是电感量的区别外，该公式与电容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。

要点：

1. 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）。
2. 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）。
3. 在比谐振频率高的频段，电感不发挥作为电感的作用。
4. 电感值 L 变小时，电感的谐振频率会升高。
5. 电感的谐振点阻抗受寄生电阻分量的限制。

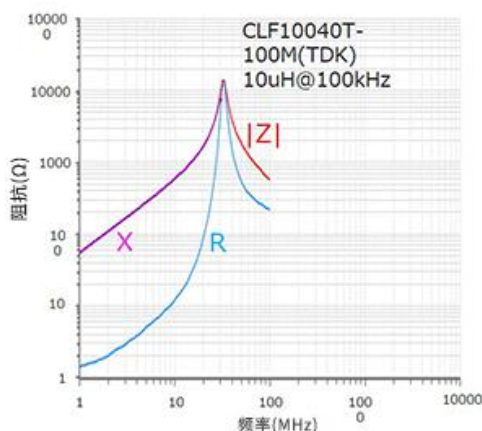
使用电感和铁氧体磁珠降低噪声的方法

使用电感的降噪方法

仅使用电容无法充分消除噪声时，可以考虑使用电感。降噪方法中使用的电感大致有两种。①绕组型电感：构成滤波器，②铁氧体磁珠：将噪声转换为热。

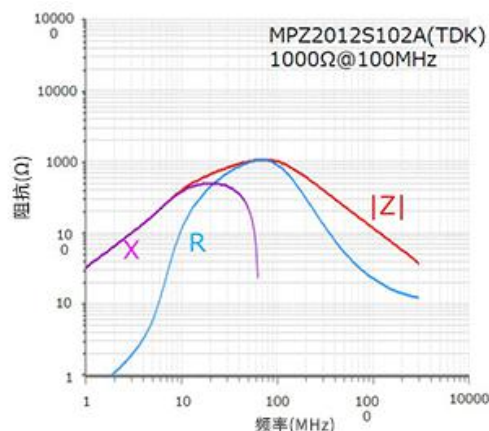
电感和铁氧体磁珠的阻抗特性

在进入使用电感和铁氧体磁珠降噪的方法介绍之前，先来了解一下它们的基本特性。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。



电感阻抗

- R分量（损耗）小
- Q值高



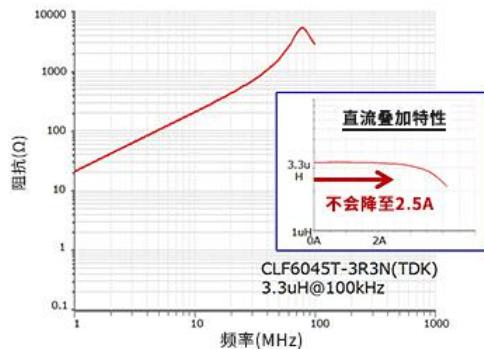
铁氧体磁珠阻抗

- R分量（损耗）大
- Q值低



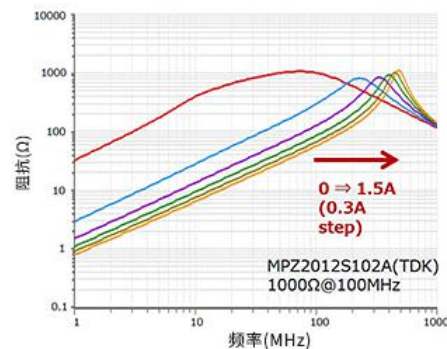
铁氧体磁珠与普通电感相比，具有电阻分量 R 较大、 Q 值较低的特性。利用该特性可消除噪声。

另外，直流电流特性也不同。



电感阻抗

- 直流电流的影响少
- 谐振点几乎不变



铁氧体磁珠阻抗

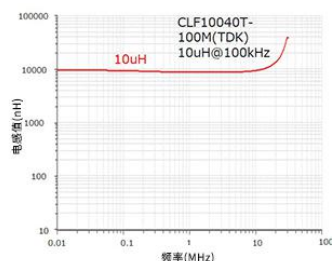
- 铁氧体对直流电流容易饱和
- 电感值下降，谐振点向高频段转移

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。

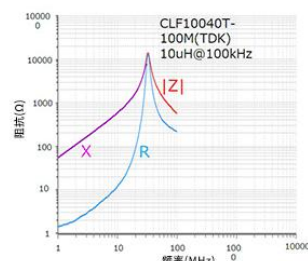
下面开始介绍使用电感和铁氧体磁珠降低噪声的方法。

①绕组型电感：构成滤波器

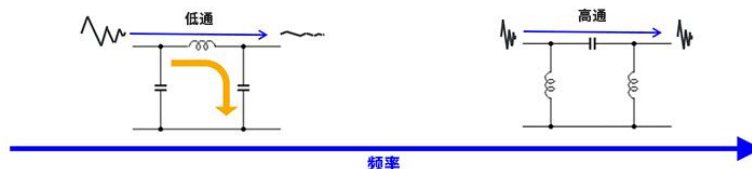
下面是关于使用了电感的 π 型滤波器的介绍。在低频段，因电感和电容而发挥低通滤波器的作用。到了高频段，由于电感会变为电容、电容会表现为电感，从而 π 型滤波器起到高通滤波器的作用，因此无法获得噪声消除效果。



电感值 vs 频率



阻抗 vs 频率

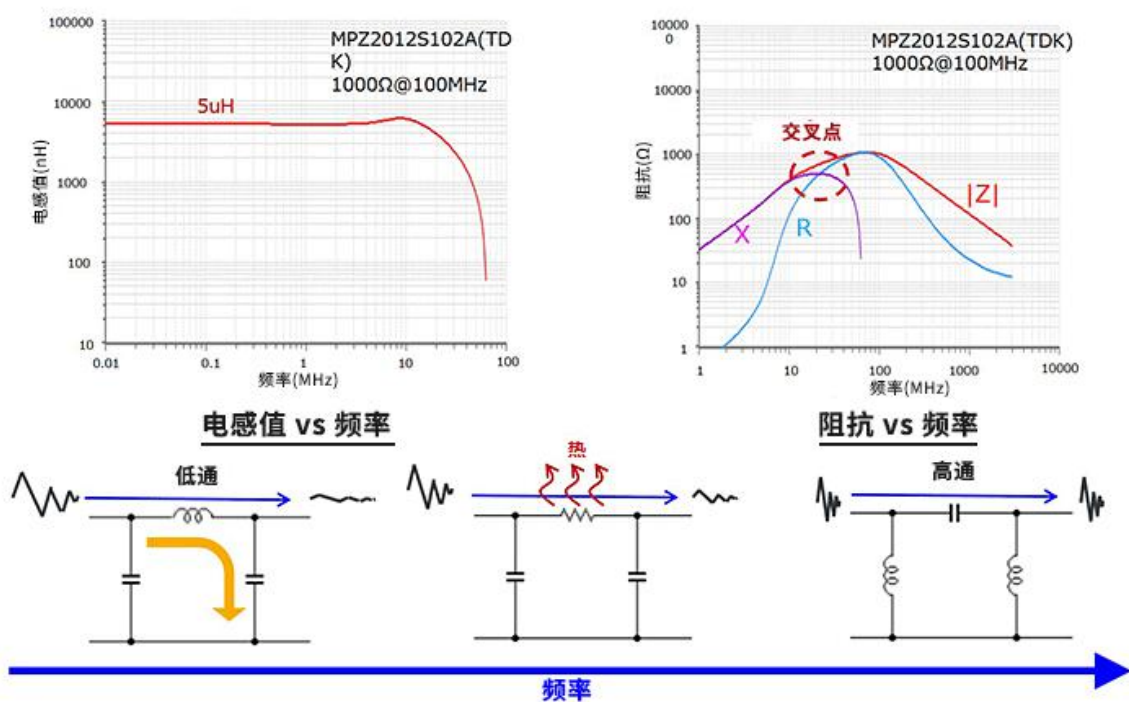




②铁氧体磁珠：将噪声转换为热

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，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。

接下来请看右侧的曲线图。电抗降低并存在与电阻分量交叉的点。当超过这个被称为“交叉点”的频段后，铁氧体磁珠将起到电阻的作用，具有将噪声转换为热的功能。这是与内置绕组型电感的滤波器之间的巨大差异。而在更高频段，则与绕组型电感相同，发挥高通滤波器的作用。



使用了铁氧体磁珠的滤波器，不仅可将噪声旁路消除，还可将噪声转换为热，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。

要点：

1. 用于降噪方法的电感，大致可以分为绕组型电感构成的滤波器和利用铁氧体磁珠进行热转换两种。
2. 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。
3. 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。

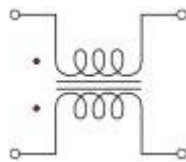
4. 铁氧体磁珠对于直流电流容易饱和，饱和会导致电感值下降，谐振点向高频段转移。
5. 普通电感构成的滤波器，可选电感值的范围较宽。
6. 铁氧体磁珠的 Q 值较低，因此在较宽频率范围内具有有效的降噪效果。

使用共模滤波器降低噪声的方法

作为使用电感的降噪方法之一，本节将介绍使用共模滤波器降噪的内容。从严格意义上讲，共模滤波器并不是电感器，而是磁性器件，是降噪方法中的重要部件。

共模滤波器

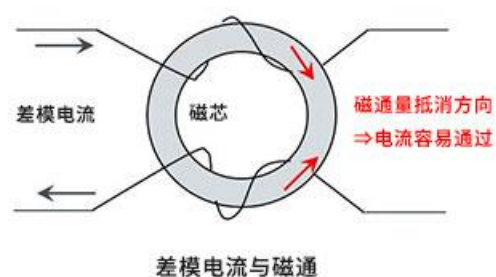
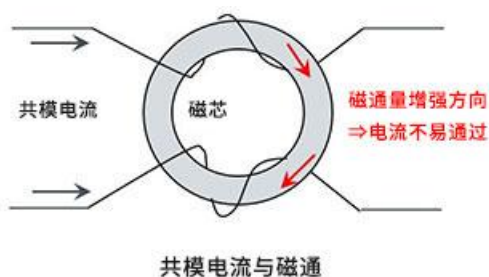
共模滤波器的结构是两个绕组绕在一个磁芯上，相当于两个电感组合在一起（见下图）。当绕组中流过电流时，磁芯产生磁通，针对急剧的电流变化，起到使电流不易流通（扼流）的作用。这与电感的自感作用相同。



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 2 根导线沿同一方向绕在一个磁芯上。

如图所示，差模电流是在 2 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。

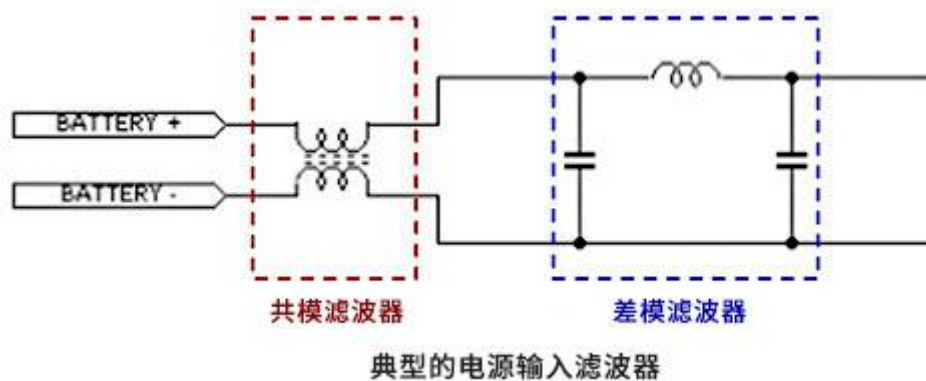
相比之下，共模电流的流向相同，因此磁通量增强，电流不易流过。也就是说，共模电流 = 共模噪声难以通过，被滤除。





使用共模滤波器降低噪声的方法

由于这里提到开关电源的噪声，因此在下面给出作为电源的输入滤波器使用的示例。



该图是在“开关电源的输入滤波器”中使用过的图，如图所示在电源的输入线插入共模滤波器。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。

要点：

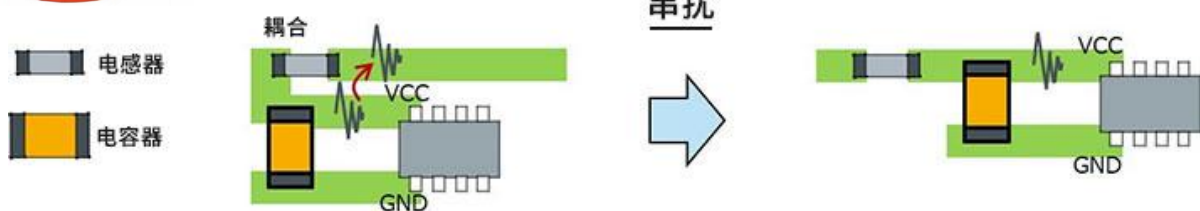
1. 使用共模滤波器消除对共模噪声。
2. 共模滤波器是利用自感作用来阻止共模电流通过的滤波器。

串扰、GND 线反弹噪声

这之前作为使用电感的降噪方法，介绍了电感和铁氧体磁珠、共模滤波器。本节将主要介绍 PCB 板布局相关的注意事项。

串扰

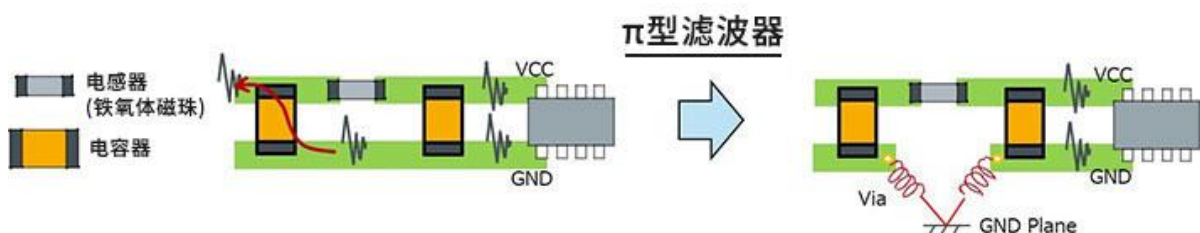
串扰是因电路板布线间的杂散电容和互感，噪声与相邻的其他电路板布线耦合，这在“何谓串扰”中已经介绍过。下面是 LC 滤波器的图形布局和部件配置带来的串扰及其方法示例。



在左侧的布局示例中，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。右侧为方法示例，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。

GND 线反弹噪声

在该示例中可以看出，在使用了 π 型滤波器的电感前后所配置的电容，其 GND 的设置方法可能会带来地线反弹噪声。在左图示例中，如箭头所示，来自 GND 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 Via 的寄生电感的手法，经由过孔 (Via) 与 GND 平面连接，改善效果较好。

经常听到“在开关电源电路中，PCB 板布局是非常重要的”，的确非常重要。这里面包含着布局诀窍。

要点：

1. 有些 PCB 板布线布局，会因串扰而导致滤波效果下降。
2. π 型滤波器的电容的 GND 的某些设置方法可能会带来地线反弹噪声。
3. 优化 PCB 板布线布局可避免这些问题。

使用电感的降噪方法总结

1. 使用电感的降噪方法



- 仅用电容无法充分消除噪声时，可考虑使用电感。
- 降噪方法中使用的电感大致有两种。

①绕组型电感：组成滤波器

②铁氧体磁珠：将噪声转换为热。

2. 电感和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。

3. 使用绕组型电感的降噪方法：组成滤波器

- 普通电感构成的滤波器，可选电感值的范围较宽。
- 使用电感的 Π 型滤波器，在低频段，因电感和电容而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。

4. 使用铁氧体磁珠的降噪方法：将噪声转换为热

- 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叉点时，铁氧体磁珠发挥电阻的作用，可将噪声转换为热。
- 使用了铁氧体磁珠的滤波器，不仅可将噪声旁路消除，还可将噪声转换为热，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换为热，是与使用绕组型电感的滤波器之间的巨大差异。
- 在更高频段，则与绕组型电感相同，发挥高通滤波器的作用。

5. 共模滤波器

▪从严格意义上讲，共模滤波器并不是电感器，但在降噪方法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。

6. 使用共模滤波器的降噪方法

▪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。

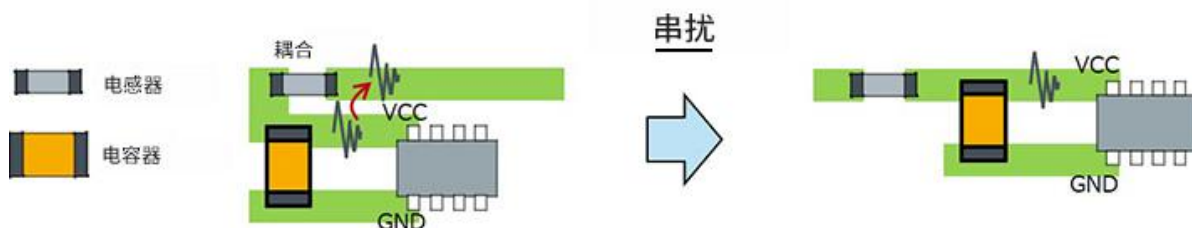
7. 串扰相关的注意事项

▪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。

▪作为方法，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。



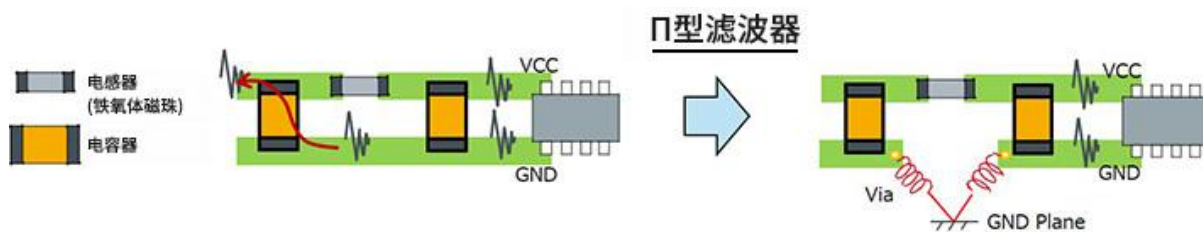


8. GND 线反弹噪声相关的注意事项

地

▪ 在使用了 Π 型滤波器的电感前后所配置的电容，其 GND 的设置方法可能会带来线反弹噪声。 ia)

▪ 作为方法，为了避免噪声直接传播，可利用 Via 的寄生电感的手法，经由过孔 (Via) 与 GND 平面连接，改善效果较好。



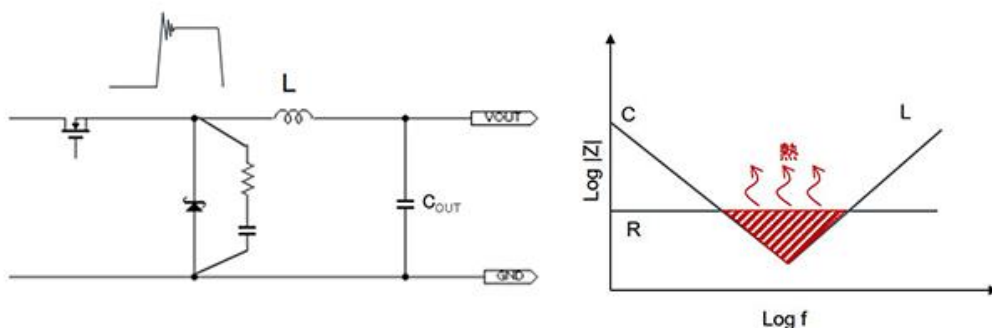


第十章 其他降噪方法

作为开关电源的降噪方法，此前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方法方法。下面介绍其中经常用到的 RC 缓冲电路。

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。在下面的示例中，整流二极管关断（高边开关导通）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。



RC 的值一般以 $R=2\ \Omega$ 、 $C=470\text{pF}$ 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：

$$\text{损耗} = C \times V_{IN}^2 \times f_{SW}$$

缓冲电路不仅可用于低边侧，在高边侧也经常使用。

要点：

1. 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。
2. 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。
3. 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。



第十一章 EMC 总结

“开关噪声—EMC 基础篇”前后共有是十一个章节，本章是最后一篇。从“EMC 基础”知识开始，以开关电源为前提分别介绍了“降噪方法（步骤与概要）”、“使用电容器降低噪声”、“使用电感降低噪声”、“其他降噪方法”相关的基础内容。本文将对各篇文章的关键要点做最终总结。

EMC 基础介绍

关键点：

- EMC（电磁兼容性）是指兼备 EMI 和 EMS 两方面的性能。
- EMI（电磁干扰）是指因辐射/发射（Emission）电磁波而对环境产生的干扰。
- EMS（电磁敏感性）是指对电磁波干扰（EMI）的耐受性/抗扰度（Immunity）。

频谱基础

关键点：

- 当频率升高时，频谱振幅整体增加。
- 上升/下降延迟时，进入-40dB/dec 衰减时的频率降低，频谱的振幅衰减。
- Duty 变更时，虽然会产生偶次谐波，但对谱峰无影响。基波频谱衰减。
- 仅上升延迟时，tr 分量从更低的频率开始衰减。

差模（常模）噪声与共模噪声

关键点：

- 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）噪声和共模噪声两类。
- 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。

串扰介绍

关键点：

- 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。

开关电源产生的噪声

关键点：

- 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。

- 这种开关噪声可通过优化 PCB 板布线等来降低，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。

降噪方法步骤

关键点：

- 随着开发进程的推进，可使用的降噪方法技术和手段越来越有限，方法成本也越来越高。

- 在产品开发的初期阶段，预先进行充分探讨与评估，可以从容有效地采取降噪方法。

- 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方法是非常重要的。

- 降噪方法按照“把握频率成分→把握产生源和传导路径→强化 GND→增加降噪部件”的步骤进行。

开关电源噪声方法的基础知识

关键点：

- 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。

开关电源的输入滤波器

关键点：



- 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。
- 对共模噪声使用共模滤波器。
- 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。

电容的频率特性

关键点：

- 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。

使用电容器降低噪声

关键点：

- 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）。

去耦电容的有效使用方法 要点 1

关键点：

- 去耦电容的有效使用方法有两个要点：①使用多个电容，②降低电容的 ESL。
- 使用多个电容时，容值相同时和不同时的效果不同。

去耦电容的有效使用方法 要点 2

关键点：

- 去耦电容的有效使用方法有两个要点：①使用多个电容，②降低电容的 ESL。
- 通过降低电容的 ESL，可改善高频特性，并可更有效地降低高频噪声。
- 有的电容虽然容值相同，但因尺寸和结构不同而 ESL 更小。

去耦电容的有效使用方法 其他注意事项

关键点：



- 理解 Q 与频率—阻抗特性之间的关系，并根据目的区分 Q 的差异。
- 高 Q 电容窄带阻抗急剧下降。低 Q 电容在较宽频段相对平缓下降。
- PCB 图形的热风焊盘等会增加电感分量，使谐振频率向低频端移动。
- 探讨方法时的试装，如果不按照现实的修改实际安装，很可能在修改后的 PCB 板上无法获得探讨时的效果。
- 电容量变化率大时，谐振频率会变化，无法获得目标频率理想的噪声消除效果。
- 在温度条件和变动较大的严苛应用中，可以探讨使用具有 CH、COG 特性的温度特性优异的电容。

<使用电感降低噪声>

电感的频率特性

关键点：

- 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。

使用电感和铁氧体磁珠降低噪声的方法

关键点：

- 用于降噪方法的电感，大致可以分为绕组型电感构成的滤波器和利用铁氧体磁珠进行热转换两种。
- 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。
- 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。
- 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。



- 普通电感构成的滤波器，可选电感值的范围较宽。
- 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。

使用共模滤波器降低噪声的方法

关键点：

- 使用共模滤波器消除对共模噪声。
- 共模滤波器是利用自感作用来阻止共模电流通过的滤波器。

串扰、GND 线反弹噪声

关键点：

- 有些 PCB 板布线布局，会因串扰而导致滤波效果下降。
- II 型滤波器的电容的 GND 的某些设置方法可能会带来地线反弹噪声。
- 优化 PCB 板布线布局可避免这些问题。

使用电感降低噪声 总结

其他降噪方法

RC 缓冲电路

关键点：

- 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。