

# 开关电源噪声—EMC



电子发烧友  
www.elecfans.com

电子发烧友 著

# 目 录

<b>第一章 EMC 基础介绍</b> .....	1
何谓 EMC.....	1
章节小结.....	2
<b>第二章 EMC 频谱基础</b> .....	3
频谱基础.....	3
波形变化与频谱变化.....	4
章节小结.....	6
<b>第三章 差模（常模）噪声与共模噪声</b> .....	7
差模（常模）噪声与共模噪声.....	7
章节小结.....	9
<b>第四章 什么是串扰</b> .....	10
章节小结.....	10
<b>第五章 开关电源产生的噪声</b> .....	11
开关电源产生的噪声.....	11
章节小结.....	13
<b>第六章 “开关电源”噪声对策步骤</b> .....	14
噪声对策和产品开发阶段.....	14
噪声对策步骤.....	14
章节小结.....	15
<b>第七章 开关电源噪声对策的基础知识</b> .....	16
章节小结.....	16
开关电源的输入滤波器.....	17
差模滤波器.....	17
共模滤波器.....	17
章节小结.....	18

# 第一章 EMC 基础介绍

从本文开始将围绕“开关噪声-EMC”这一主题，对开关电源相关的 EMC 及其对策等进行解说。计划先介绍 EMC 相关的基础知识，然后再探讨噪声对策相关的内容。

第一章将围绕 EMC 的基础，由浅及深地给大家介绍 EMC 相关的知识，以此作为起点。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。如果不能很好地理解各个术语的意义，在使用时，某些情况下可能会存在无法准确传递信息、无法沟通的情况。

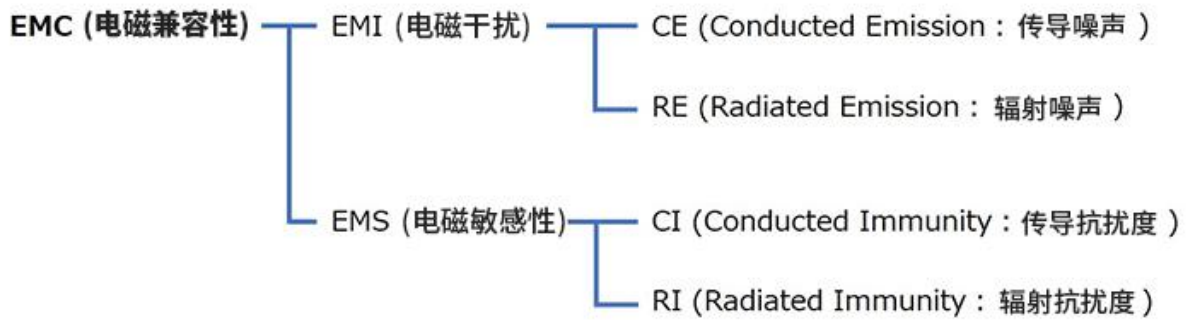
## 何谓 EMC

EMC 是 Electromagnetic Compatibility (电磁兼容性) 的缩写，在日语中多用“电磁两立性”或“电磁适合性”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”是指如果没有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。这两个术语在日文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 中分别都有抗扰度要求。它们的关系如下。



以上即相关术语解释及关系。简而言之，即 EMC 是 EMI 和 EMS 是否满足标准规范的关键。将上述解说汇总如下。

术语	意义	备注
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	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板布线传导的噪声	
辐射 (发射) 噪声 Radiated Emission	排放 (辐射) 到环境中的噪声	

## 章节小结

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/排放 (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) 。

## 第二章 EMC 频谱基础

作为基础内容，先简单介绍一下“何谓频谱？”。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）”。虽然所引用的解释比较简短，不过再次仔细思考就会觉得“的确如此”。

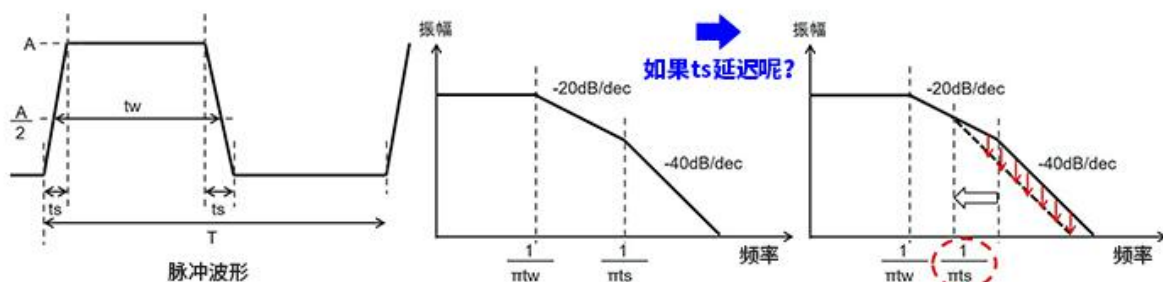
这里介绍的频谱是指电气信号的频谱。具体来说，是基于通称“频谱分析仪/Spectrum Analyzer”的频谱分析仪器的数据（横轴作为频率，纵轴作为功率或电压）进行介绍。

### 频谱基础

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。首先来看下面的原理示意图。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）。

中间的图是基于傅里叶变换的理论上的脉冲波形频谱。这是“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”的常见频谱。

右图表示脉冲的  $t_s$  延迟后的频谱变化。斜率变为  $-40\text{dB}/\text{dec}$  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”。

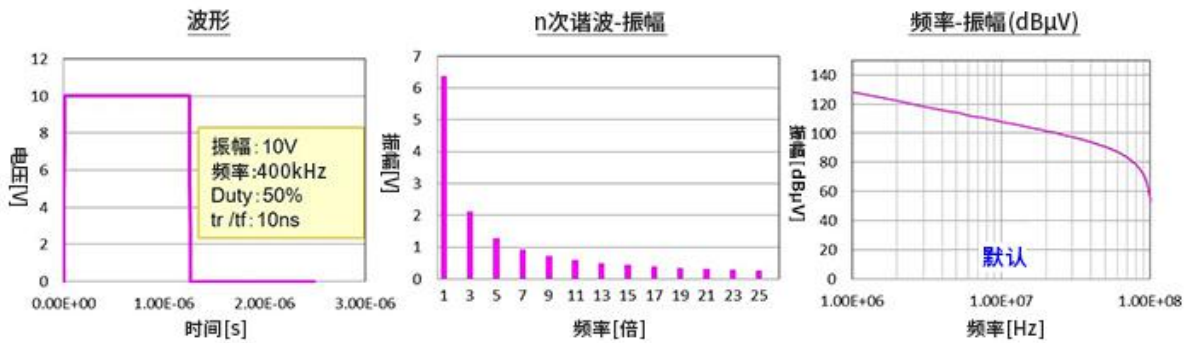


接下来将使用实际的频谱分析仪数据来看频率等其他参数变化时的频谱变化。这里的关键点是“对于信号波形的变化，频谱将以怎样的趋势变化”。这是用来通过实际的开关电源电路的开关相关的频谱来分析并解决 EMC 问题所必须的知识。

## 波形变化与频谱变化

前面给出的图是用来比较的默认条件下的数据。下面波形图中的条件是：振幅 10V，频率 400kHz，Duty（占空比）50%，tr/tf（上升时间/下降时间）10ns。

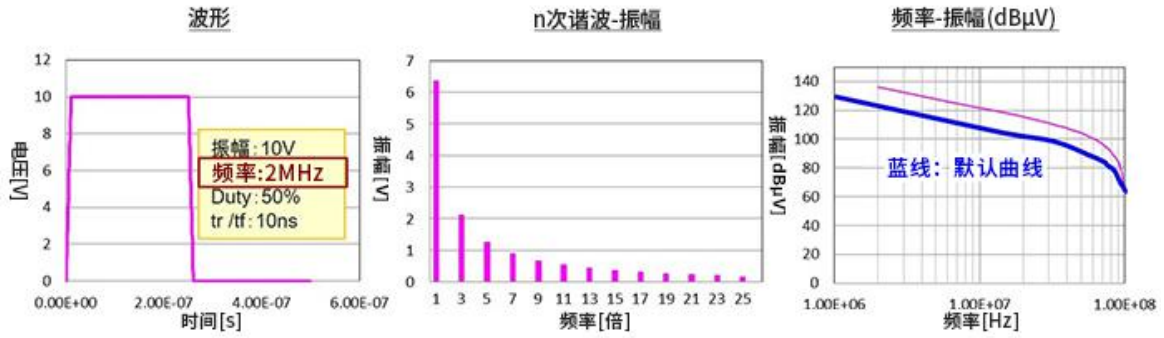
中间的图表示 n 次谐波和振幅（V）的关系。1 倍的频率 = 基波，也就是说 400kHz 的分量最大，以奇数倍的频率形成频谱。



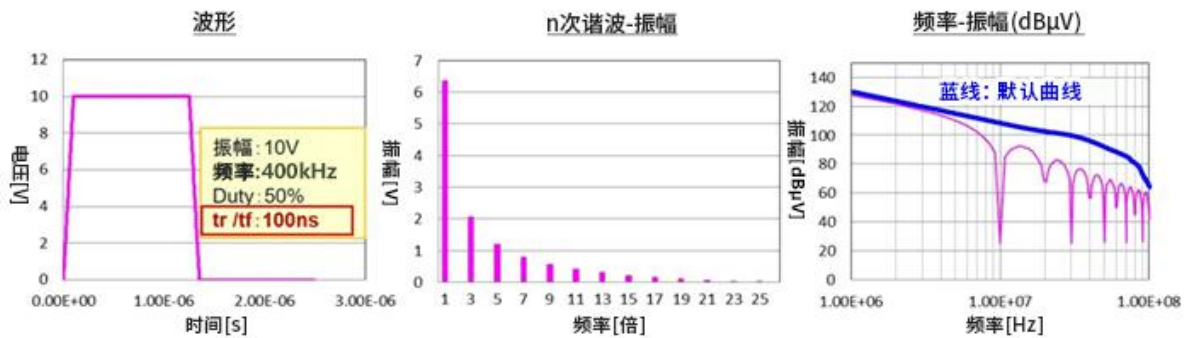
谐波仅为奇数次是 Duty 为 50% = 1:1 的频谱特征。各分量的大小为基波分量的 1/次数，例如 3 次谐波分量为 1/3，n 次谐波分量为 1/n。

右图是振幅为 dBμV 的对数曲线图。顺便提一下，dB μV 是基于以 1μV 电压为基准的电压比的 dB 值。

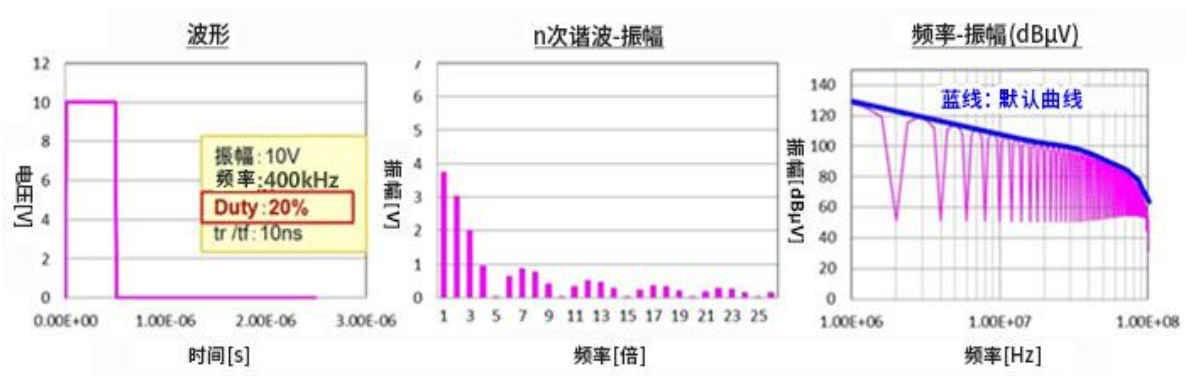
①将频率变更为 2MHz 时的频谱。从频率—振幅（dBμV）关系图可以明确看出，当频率增加时振幅整体增加。



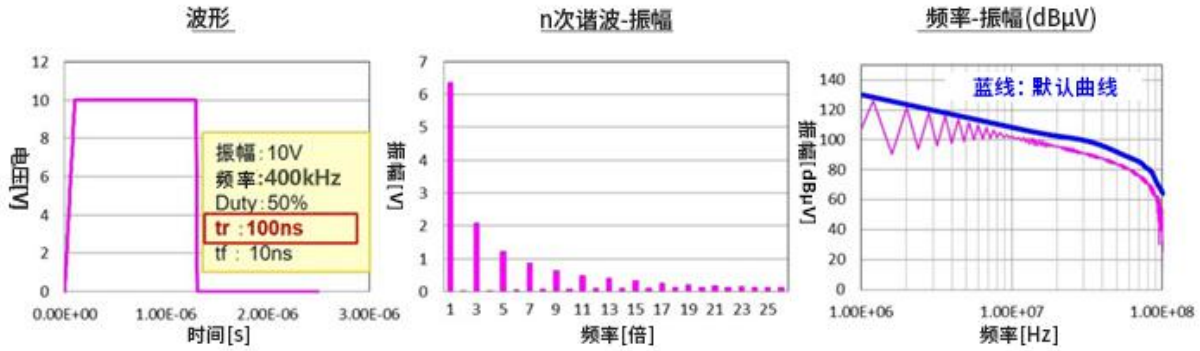
②tr 和 tf 同时延迟为 100ns 时的频谱。结果如原理示意图所示，进入-40dB/dec 衰减时的频率降低，频谱的振幅衰减。



③将 Duty50%变为 20%时的频谱。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。



④仅 tr (上升时间) 延迟时的频谱。tr 相关的分量因 tr 延迟而从更低的频率开始衰减。



下面汇总了每种情况的结果。总而言之，当频率较低且上升/下降较慢时，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频率升高	⇒ 频谱的振幅整体增加
②上升/下降延迟	⇒ 进入-40dB/dec 衰减时的频率变低，频谱的振幅衰减
③Duty 变更	⇒ 产生偶次谐波，但对谱峰无影响。基波频谱衰减
④仅上升延迟	⇒ tr 分量从更低的频率开始衰减

另外，这里的“频谱”是指英语的“Spectrum”。虽然这并非本文主题，但稍微介绍一下仅作为了解。

## 章节小结

1. 当频率升高时，频谱振幅整体增加。
2. 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。
3. 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。
4. 仅上升延迟时，tr 分量从更低的频率开始衰减。

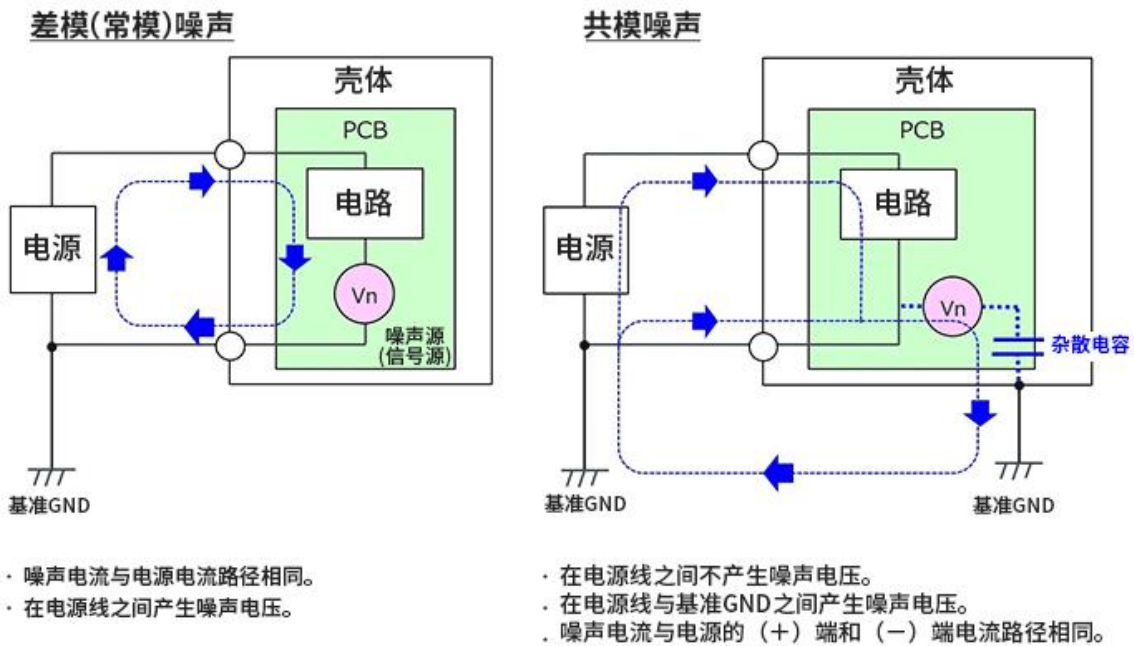


## 第三章 差模（常模）噪声与共模噪声

在本系列文章的第一篇“何谓 EMC”中曾提到过电磁干扰 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（常模）噪声”和“共模噪声”两种。本文将对这两种噪声进行介绍。

### 差模（常模）噪声与共模噪声

传导噪声可分为两种。一种是“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。另一种是“共模噪声”。来看下图。本文是围绕电源展开介绍的，因此图例是将带有电路的印刷电路板（PCB）装在壳体中，并由外部给电的示例图。



差模噪声产生在电源线之间，是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。由于往返方向相反而被称为“差模（Differential mode）”。

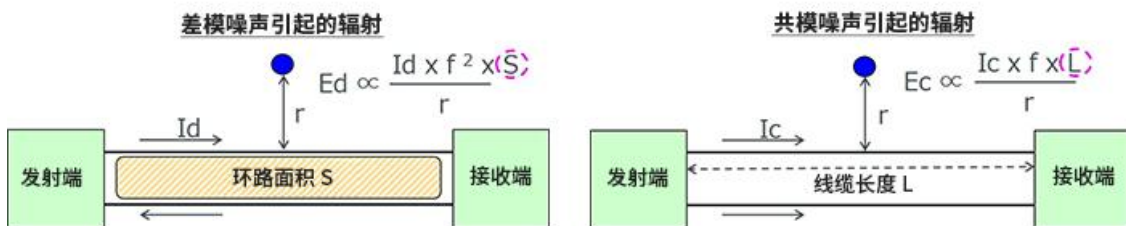
共模噪声是经杂散电容等泄漏的噪声电流经由大地返回电源线的噪声。因电源的（+）端和（-）端流过的噪声电流方向相同而被称为“共模（Common mode）”。在

电源线间不产生噪声电压。

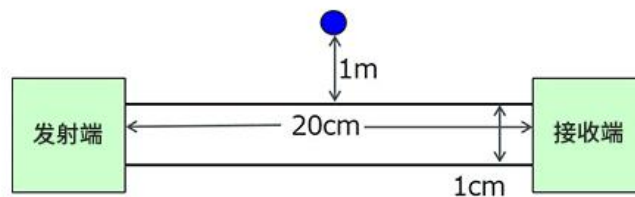
如前所述，这些噪声即为传导噪声。不过，由于电源线中流动着噪声电流，因此会发出噪声。

由差模噪声引起的辐射的电场强度  $E_d$  可通过左下方的公式来表示。 $I_d$  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。

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



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。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



**差模噪声**

假设频率100MHz的差模噪声电流1μA  
流经环路面积20cm<sup>2</sup>，  
则距离1m地点(90度)的电场强度值为：

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

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

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

**共模噪声**

假设频率100MHz的共模噪声电流1μA  
流经20cm长的线缆，则距离1m地点(90度)的  
电场强度值为：

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

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

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

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。特别需要记住的是，在考虑辐射噪声对策时，针对共模噪声的对策是非常重要的。

关于具体对策，后续会逐步介绍，其中最原则性的噪声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限制的情况，此时需要探讨增加滤波器的方法。

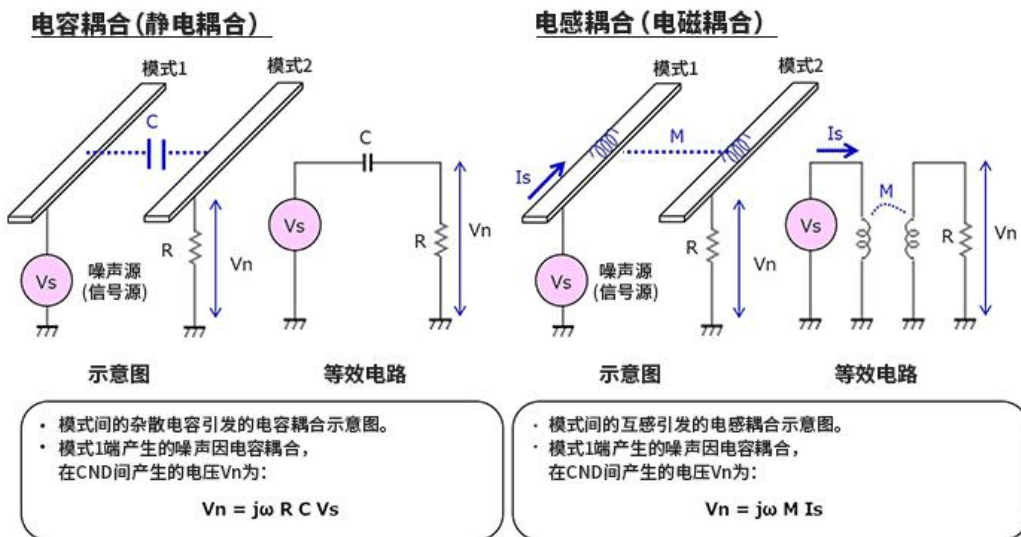
## 章节小结

1. 电磁干扰 EMI 大致可分为“传导噪声”和“辐射噪声”两种。
2. 传导噪声可分为差模（常模）噪声和共模噪声两类。
3. 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。
4. 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。

## 第四章 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”。特别是“串音”在模拟通讯时代是字如其意、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。下图为每种耦合的示意图以及最简化的等效电路。



※Vn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

上图中用公式给出了将两者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Vn。R为电阻，C为电容，M为互感，Vs为噪声源电压，Is为噪声源电流。

在这里请记住，平行的布线间会发生串扰。顺便提一下，如果布线是正交结构，则杂散电容和互感都会显著减少。

### 章节小结

平行的布线间会产生串扰。

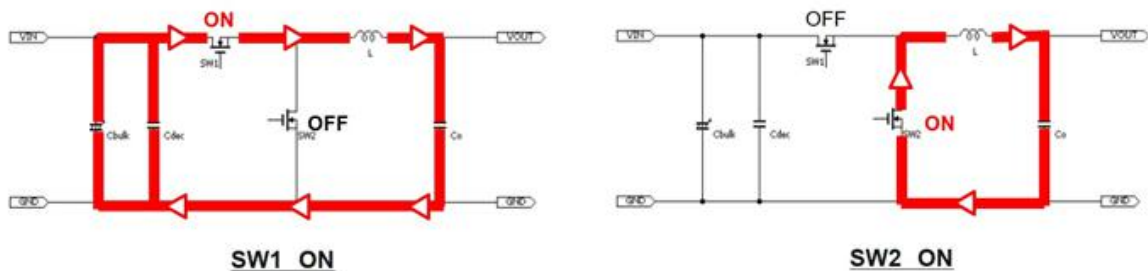
串扰的因素有杂散（寄生）电容引发的电容（静电）耦合和互感引发的电感（电磁）耦合。

## 第五章 开关电源产生的噪声

本节将探讨实际的开关电源产生的噪声。

### 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。



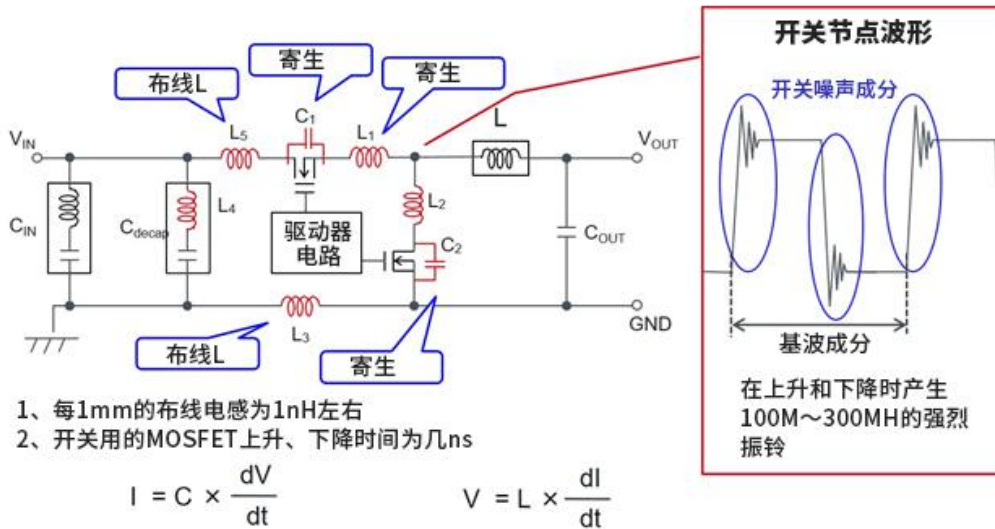
SW1 为高边开关，SW2 为低边开关。SW1 导通（SW2 为 OFF）时，电流路径是从输入电容器到 SW1、再经由电感 L 到输出电容器。SW2 导通（SW1 为 OFF）时，电流路径是从 SW2 经由 L 再到输出电容器。下图表示这些电流路径的差分，每当开关 ON/OFF 时，红色线路的电流都会急剧变化。该环路的电流变化非常剧烈，所以会因 PCB 板布线电感而在环路内会产生高频振铃。

- 左图粗线部分是电流因 SW ON/OFF 而急剧变化的环路。
- 该环路因流过 SW 切换时的高频电流，而在环路内产生振铃。

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

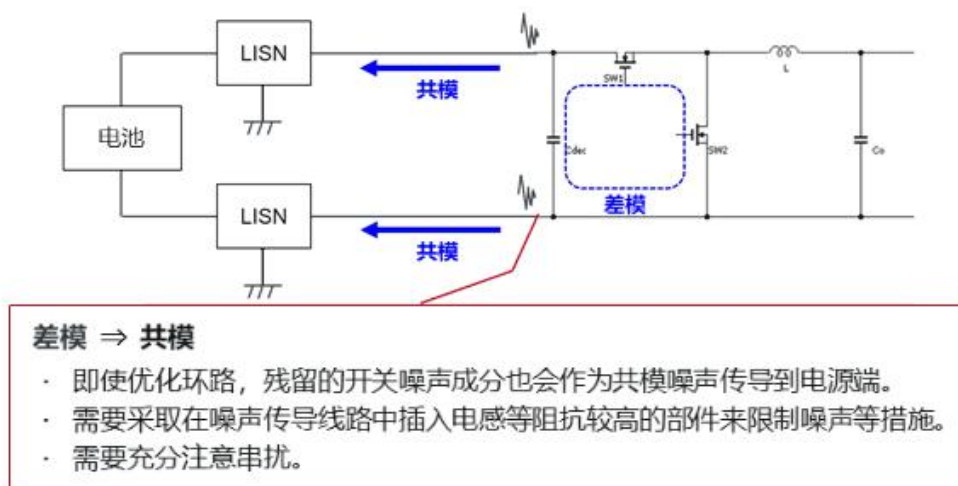
例：对具有 10nH 电感成分的线路，使 1A 的电流以 10ns 变化时，将产生 1V 的电压。

图中表示构成电源电路的外置部件、实装多层电路板的寄生分量及振铃的关系。



红色部分标出的是上图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,如红框内的图例所示,开关节点将产生 100MHz~300MHz 的振铃。所产生的电流及电压,可通过两个公式求得。

此振铃会作为高频开关噪声带来各种影响。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。关于 PCB 板布局,在 DC/DC 转换器的“PCB 板布局”部分有详细介绍,请参考。



关于差模噪声和共模噪声,请看前面文章;关于串扰,请看上一章节。关于共模滤波器,将在后续章节进行介绍。

## 章节小结

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。

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。

## 第六章 “开关电源” 噪声对策步骤

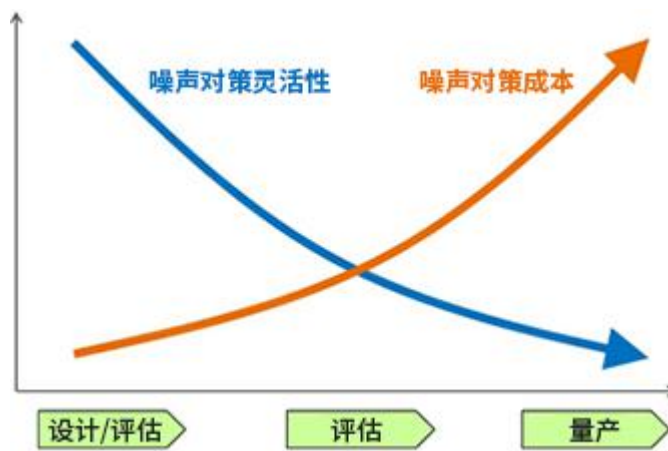
从本文开始进入新篇章“噪声对策”。这里所说的“噪声对策”是指针对“开关电源”噪声的对策。不过基础部分和思路与一般噪声是相通的。

### 噪声对策和产品开发阶段

在介绍噪声对策步骤之前，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噪声对策。

右图是相对于设计/开发、评估、量产的时间轴，采取噪声对策的灵活性（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”。

由图可见，随着开发进程的推进，可使用的噪声对策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，最终只能变更 PCB 板... 等等，这样的事情谁也不希望发生。



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，也可以从容有效地采取噪声对策。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，甚至导致噪声反而恶化的情况。

### 噪声对策步骤

如前所述，盲目的对策只会增加损失。在确定对策之前，需要遵循以下几个步骤：



### 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。噪声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：强化 GND

噪声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 GND。优异的 GND 设计不仅可降低噪声，还是提升性能和稳定性的重要环节。通过强化 GND，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，探讨相应的噪声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、通过旁路电容来旁路滤除、通过芯片磁珠等的电阻成分来吸收噪声等。滤波器、旁路电容的效果等如步骤 3 所述，会受 GND 好坏的影响，所以请务必先强化 GND。

## 章节小结

随着开发进程的推进，可使用的噪声对策技术和手段越来越有限，对策成本也越来越高。

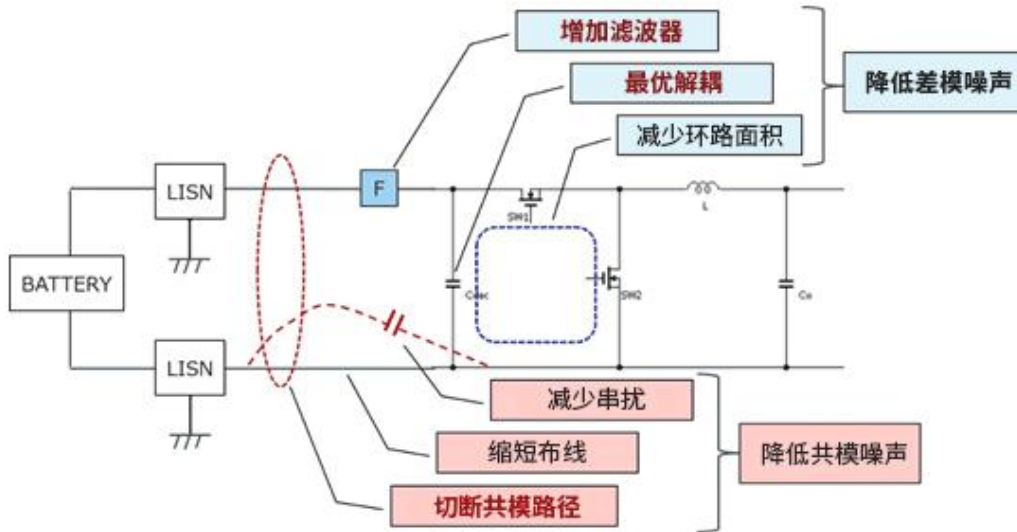
在产品开发的初期阶段，预先进行充分探讨与评估，可以从容有效地采取噪声对策。

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。

噪声对策按照“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。

## 第七章 开关电源噪声对策的基础知识

此前对“差模（常模）噪声与共模噪声”和“串扰”的基本噪声进行了介绍。下图是这些噪声及其相应的基本对策。



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）。

后续将依次对图中红色字体所示的滤波器（输入滤波器及共模滤波器）和解耦进行解说。

### 章节小结

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。

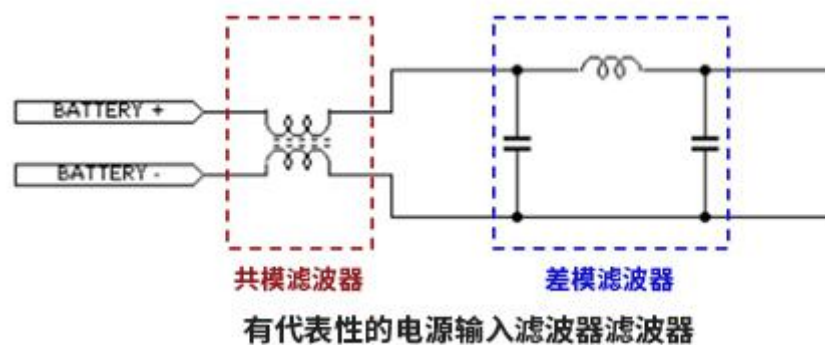
尽可能地抑制噪声的发生源 - 差模噪声是非常重要的，也关系到降低共模噪声。

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。

在上一章节中，作为噪声对策的基础知识，分共模噪声和差模噪声分别介绍了大致对策。本文中概述开关电源的输入滤波器，后续将会分别详细介绍。

## 开关电源的输入滤波器

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。



### 差模滤波器

共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  $\pi$  型滤波器。各部件对噪声具有如下作用：

电容器：将噪声电流旁路到 GND。

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换为热。

电阻：将噪声电流转换为热。

### 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。

## 章节小结

1. 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。
2. 对共模噪声使用共模滤波器。
3. 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。