

开关电源的电磁兼容性技术分析

1 引言

电磁兼容是一门新兴的跨学科的综合应用学科。作为边缘技术，它以电气和无线电技术的基本理论为基础，并涉及许多新的技术领域，如微波技术、微电子技术、计算机技术、通信和网络技术以及新材料等。电磁兼容技术应用的范围很广，几乎所有现代化工业领域，如电力、通信、交通、航天、军工、计算机和医疗等都必须解决电磁兼容问题。其研究的热点内容主要有：电磁干扰源的特性及其传输特性、电磁干扰的危害效应、电磁干扰的抑制技术、电磁频谱的利用和管理、电磁兼容性标准与规范、电磁兼容性的测量与试验技术、电磁泄漏与静电放电等。

电磁兼容的英文名称为 Electromagnetic Compatibility，简称 EMC。所谓电磁兼容是指设备（分系统、系统）在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态。这里包含两层意思，即它工作中产生的电磁辐射要限制在一定水平内，另外它本身要有一定的抗干扰能力。这便是设备研制中所必须解决的兼容问题。电磁兼容技术涉及的频率范围宽达 0 GHz ~400GHz，研究对象除传统设备外，还涉及芯片级，直到各种舰船、航天飞机、洲际导弹甚至整个地球的电磁环境。

电磁兼容三要素是干扰源（骚扰源）、耦合通路和敏感体。切断以上任何一项都可解决电磁兼容问题，电磁兼容的解决常用的方法主要有屏蔽、接地和滤波。

2 电磁兼容技术名词

（1）电磁兼容性

电磁兼容性是指设备或者系统在其电磁环境中能正常工作，且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。

（2）电磁骚扰

电磁骚扰是指任何可能引起设备、装备或系统性能降低或者对有生命或者无生命物质产生损害作用的电磁现象。电磁骚扰可引起设备、传输通道或系统性能的下降。它的主要要素有自然和人为的骚扰源、通过公共地线阻抗/内阻的耦合、沿电源线传导的电磁骚扰和辐射干扰等。电子系统受干扰的路径为：经过电源，通过信号线或控制电缆、场渗透，经过天线直接进入；通过电缆耦合，从其他设

备来的传导干扰；电子系统内部场耦合；其他设备的辐射干扰；电子设备外部耦合到内部场；宽带发射机天线系统；外部环境场等。

（3）电磁环境

电磁环境是一种明显不传送信息的时变电磁现象，它可能与有用信号叠加或组合。

（4）电磁辐射

电磁辐射是指电磁波由源发射到空间的现象。“电磁辐射”一词的含义有时也可引申，将电磁感应现象也包含在内。RFI/EMI 可以通过任何一种设备机壳的开口、通风孔、出入口、电缆、测量孔、门框、舱盖、抽屉和面板以及机壳的非理想连接面等进行辐射。RFI/EMI 也可由进入敏感设备的导线和电缆进行辐射，任何一个良好的电磁能量辐射器也可以作为良好的接收器。

（5）脉冲

脉冲是指在短时间内突变，随后又迅速返回至其初始值的物理量。

（6）共模干扰和差模干扰

电源线上的干扰有共模干扰和差模干扰两种方式。共模干扰存在于电源任何一相对大地或电线对大地之间。共模干扰有时也称纵模干扰、不对称干扰或接地干扰。这是载流导体与大地之间的干扰。差模干扰存在于电源相线与中线及相线与相线之间。差模干扰也称常模干扰、横模干扰或对称干扰。这是载流导体之间的干扰。共模干扰提示了干扰是由辐射或串扰耦合到电路中的，而差模干扰则提示了干扰是源于同一条电源电路。通常这两种干扰是同时存在的，由于线路阻抗的不平衡，两种干扰在传输中还会相互转化，所以情况十分复杂。干扰经长距离传输后，差模分量的衰减要比共模大，这是因为线间阻抗与线-地阻抗不同的缘故。出于同一原因，共模干扰在线路传输中还会向邻近空间辐射，而差模则不会，因此共模干扰比差模更容易造成电磁干扰。不同的干扰方式要采取不同的干扰抑制方法才有效。判断干扰方法的简便方法是采用电流探头。电流探头先单独环绕每根导线，得出单根导线的感应值，然后再环绕两根导线（其中一根是地线），探测其感应情况。如感应值是增加的，则线路中干扰电流是共模的；反之则是差模的。

（7）抗扰度电平和敏感性电平

抗扰度电平是指将某给定的电磁骚扰施加于某一装置、设备或者系统并使其仍然能够正常工作且保持所需性能等级时的最大骚扰电平。也就是说，超过此电平时该装置、设备或者系统就会出现性能降低。而敏感性电平是指刚刚开始出现性能降低的电平。所以，对某一装置、设备或者系统而言，抗扰度电平与敏感性电平是同一数值。

（8）抗扰度裕量

抗扰度裕量是指装备、设备或者系统的抗扰度电平限值与电磁兼容电平之间的插值。

3 开关电源的电磁兼容性

开关电源因工作在高电压大电流的开关工作状态下，引起电磁兼容性问题的原因是相当复杂的。从整机的电磁性讲，主要有共阻抗耦合、线间耦合、电场耦合、磁场耦合及电磁波耦合几种。共阻耦合主要是骚扰源与受骚扰体在电气上存在的共同阻抗，通过该阻抗使骚扰信号进入受骚扰体。线间耦合主要是产生骚扰电压及骚扰电流的导线或 PCB 线因并行布线而产生的相互耦合。电场耦合主要是由于电位差的存在，产生感应电场对受骚扰体产生的场耦合。磁场耦合主要是指在大电流的脉冲电源线附近，产生的低频磁场对骚扰对象产生的耦合。电磁场耦合主要是由于脉动的电压或电流产生的高频电磁波通过空间向外辐射，对相应的受骚扰体产生的耦合。实际上，每一种耦合方式是不能严格区分的，只是侧重点不同而已。

在开关电源中，主功率开关管在很高的电压下，以高频开关方式工作，开关电压及开关电流均接近方波，从频谱分析知，方波信号含有丰富的高次谐波。该高次谐波的频谱可达方波频率的 1000 次以上。同时，由于电源变压器的漏电感及分布电容以及主功率开关器件的工作状态非理想，在高频开或关时，常常产生高频高压的尖峰谐波震荡。该谐波震荡产生的高次谐波，通过开关管与散热器间的分布电容传入内部电路或通过散热器及变压器向空间辐射。用于整流及续流的开关二极管，也是产生高频骚扰的一个重要原因。因整流及续流二极管工作在高频开关状态，二极管的引线寄生电感、结电容的存在以及反向恢复电流的影响，使之工作在很高的电压及电流变化率下，且产生高频震荡。整流及续流二极管一

般离电源输出线较近，其产生的高频骚扰最容易通过直流输出线传出。开关电源为了提高功率因数，均采用了有源功率因数校正电路。同时，为了提高电路的效率及可靠性，减少功率器件的电应力，大量采用了软开关技术。其中零电压、零电流或零电压/零电流开关技术应用最为广泛。该技术极大的降低了开关器件所产生的电磁骚扰。但是，软开关无损吸收电路多数利用 L、C 进行能量转移，利用二极管的单向导电性能实现能量的单向转换，因此，该谐振电路中的二极管成为电磁骚扰的一大骚扰源。

开关电源一般利用储能电感及电容器组成 L、C 滤波电路，实现对差模及共模骚扰信号的滤波。由于电感线圈的分布电容，导致了电感线圈的自谐振频率降低，从而使大量的高频骚扰信号穿过电感线圈，沿交流电源线或直流输出线向外传播。滤波电容器随着骚扰信号频率的上升，引线电感的作用导致电容量及滤波效果不断的下降，甚至导致电容器参数改变，也是产生电磁骚扰的一个原因。

4 电磁兼容性的解决方法

从电磁兼容的三要素讲，要解决开关电源的电磁兼容性问题，可从三个方面入手：第一，减小骚扰源产生的骚扰信号；第二，切断骚扰信号的传播途径；第三，增强受骚扰体的抗骚扰能力。在解决开关电源内部的兼容性时，可以综合利用上述三个方法，以成本效益比及实施的难易性为前提。因而，开关电源产生的对外骚扰，如电源线谐波电流、电源线传导骚扰、电磁场辐射骚扰等只能用减小骚扰源的方法来解决。一方面，可以增强输入/输出滤波电路的设计，改善 APFC 电路的性能，减小开关管及整流、续流二极管的电压、电流变化率，采用各种软开关电路拓扑及控制方式等；另一方面，加强机壳的屏蔽效果，改善机壳的缝隙泄漏，并进行良好的接地处理。而对外部的抗骚扰能力（如浪涌、雷击）应优化交流电输入及直流输出端口的防雷能力。通常，对 1.2/50 μ s 开路电压及 8/20 μ s 短路电流的组合雷击波形，因能量较小，通常采用氧化锌压敏电阻与气体放电管等的组合方法来解决。对于静电放电，通常在通信端口及控制端口的小信号电路中，采用 TVS 管及相应的接地保护、加大小信号电路与机壳等的电距离来解决或选用具有抗静电骚扰的器件。快速瞬变信号含有很宽的频谱，很容易以共模的方式传入控制电路内，采用与防静电相同的方法并减小共模电感的分布电容、加强

输入电路的共模信号滤波（加共模电容或插入损耗型的铁氧体磁环等）来提高系统的抗扰性能。

减小开关电源的内部骚扰，实现其自身的电磁兼容性，提高开关电源的稳定性及可靠性，应从以下几个方面入手：①注意数字电路与模块电路 PCB 布线的正确分区；②数字电路与模拟电路电源的去耦；③数字电路与模拟电路单点接地、大电流电路与小电流特别是电流电压取样电路的单点接地以减小共阻骚扰，减小地环地影响，布线时注意相邻线间的间距及信号性质，避免产生串扰，减小输出整流回路及续流二极管回路与支流滤波电路所包围的面积，减小变压器的漏电、滤波电感的分布电容，运用谐振频率高的滤波电容器等。

5 滤波器结构

滤波是一种抑制传导干扰的方法。例如，在电源输入端接上滤波器，可以抑制来自电网的噪声对电源本身的侵害，也可以抑制由开关电源产生并向电网反馈的干扰。电源滤波器作为抑制电源线传导干扰的重要单元，在设备或系统的电磁兼容设计中具有极其重要的作用。它不仅可以抑制传输线上的传导干扰，同时对传输线上的辐射发射也具有显著的抑制效果。在滤波电路中，选用穿心电容、三端电容、铁氧体磁环，能够改善电路的滤波特性。进行适当的设计或选择合适的滤波器，并正确的安装滤波器是抗干扰技术的重要组成部分。在交流电输入端加装的电源滤波器电路如图 1 所示。图中 L_d 、 C_d 用于抑制差模噪声，一般取 L_d 为 100 mH - 700mH， C_d 取 $1\mu\text{F}$ - $10\mu\text{F}$ 。 L_c 、 C_c 用于抑制共模噪声，可根据实际情况加以调整。

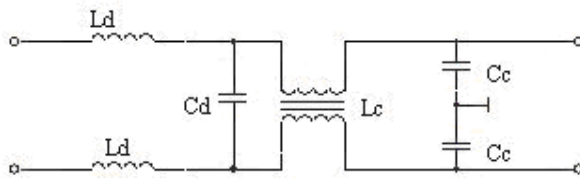


图 1 电源滤波器

所有电源滤波器都必须接地（厂家特别说明允许不接地的除外），因为滤波器的共模旁路电容必须在接地时才起作用。一般的接地方法是除了将滤波器与金属外壳相接之外，还要用较粗的导线将滤波器外壳与设备的接地点相连。接地阻抗越低，滤波效果越好。

滤波器尽量安装在靠近电源入口处。滤波器的输入及输出端要尽量远离，避免干扰信号从输入端直接耦合到输出端。

如在电源输出端加输出滤波器、加装高频电容、加大输出滤波电感的电感量及滤波电容的容量，则可以抑制差模噪声。如果把多个电容并联，则效果会更好。

几种滤波器的构成如图 2 所示。在图 2 (a) 中，阻抗 $Z=1/(\omega C1)$ ，高频区域用陶瓷电容、聚酯薄膜电容并联，其滤波效果更好。图 2 (b) 中，噪声能通过电容旁路到地线上，这种滤波器连接时应使接地阻抗尽量小。图 2 (c) 中，C1、C2 对不对称噪声有良好的滤波效果，C3 对对称噪声有良好的滤波效果，连接时应使电容器的引线及接地线尽量短。图 2 (d) 为常用的噪声滤波电路，L1、L2 对噪声呈现高阻抗，而 C1 则对噪声呈现低阻抗。当 L1、L2 采用共模电感结构时，对对称和非对称噪声都有较好的滤波效果。图 2 (e) 适用于共模噪声进行滤波，应注意的是其接地阻抗同样应尽量小。

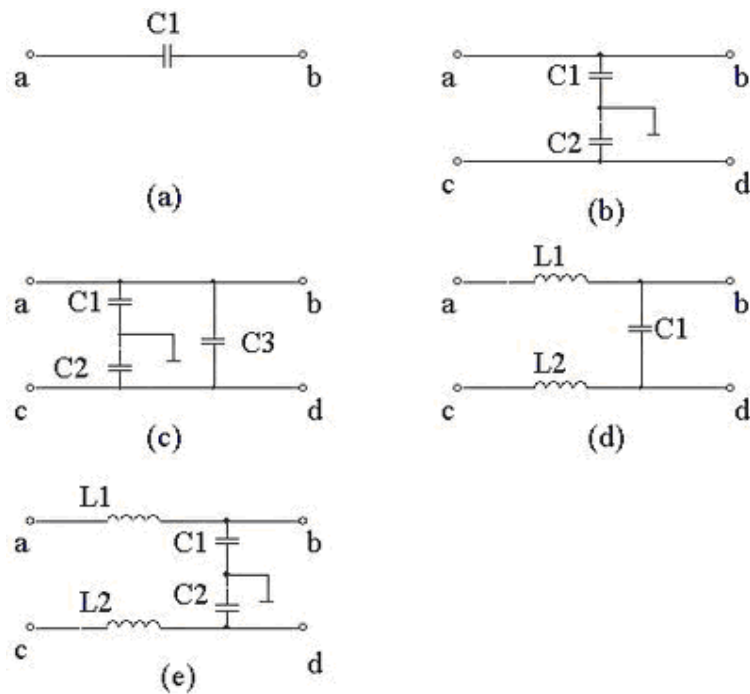


图 2 各种滤波器构成

图 3 是对共模噪声和差模噪声都有效的滤波器电路。其中，L1、L2、C1 为抑制差模噪声回路，L3、C2、C3 构成抑制共模噪声回路。L1、L2 的铁心应选择不易磁饱和的材料及 M-F 特性优良的铁心材料。C1 使用陶瓷电容或聚酯薄膜电

容，应有足够的耐压值，其容量一般取 $0.22\mu\text{F}$ - $0.47\mu\text{F}$ 。L3 为共模电感，对共模噪声具有较高的阻抗、较好的抑制效果。

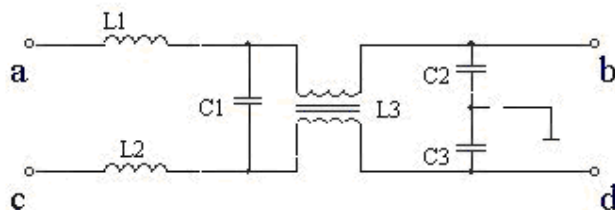


图 3 滤波器电路

6 EMI 滤波器选用与安装

开关电源 EMI 滤波器中的 4 只电容器用了两种不同的下标“x”和“y”，不仅说明了它们在滤波网络中的作用，还表明了它们在滤波网络中的安全等级。无论是选用还是设计 EMI 滤波器，都要认真的考虑 Cx 和 Cy 的安全等级。在实际应用中，Cx 电容接在单相电源线的 L 和 N 之间，它上面除加有电源额定电压外，还会叠加 L 和 N 之间存在的 EMI 信号峰值电压。因此，要根据 EMI 滤波器的应用场合和可能存在的 EMI 信号峰值，正确选用适合安全等级的 Cx 电容器。Cy 电容器是接在电源供电线 L、N 与金属外壳（E）之间的，对于 220V、50Hz 电源，它除符合 250V 峰值电压的耐压要求外，还要求这种电容器在电气和机械性能方面具有足够的安全裕量，以避免可能出现的击穿短路现象。

EMI 滤波器是具有互异性的，即把负载接在电源端还是负载端均可。在实际应用中，为达到有效抑制 EMI 信号的目的，必须根据滤波器两端将要连接的 EMI 信号源阻抗和负载阻抗来选择该滤波器的网络结构和参数。当 EMI 滤波器两端阻抗都处于失配状态时，即图 4 中 $Z_s \neq Z_{in}$ 、 $Z_L \neq Z_{out}$ 时，EMI 信号会在其输入和输出端产生反射，增加对 EMI 信号的衰减。其信号的衰减 A 与反射 Γ 的关系为： $A = -10\text{Lg}(1 - |\Gamma|^2)$ 。

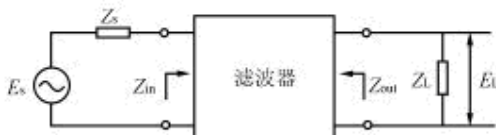


图 4 滤波器工作原理

在使用开关电源滤波器时，要注意滤波器在额定电流下的电源频率。在安装滤波器时，要特别注意滤波器的输入导线与输出导线的间隔距离，不能把它们捆在一起走线，否则 EMI 信号很容易从输入线上耦合到输出线上，这将大大降低滤波器的抑制效果。

7 结语

在开关电源设计中，为了少走弯路和节省时间，应充分考虑并满足抗干扰性的要求，避免在设计完成后去进行抗干扰的补救措施。