

开关电源的电磁兼容性及抗电磁干扰设计

Design of EMC and Anti-EMI on SPS

尹文新 供稿

摘要 :开关电源工作在复杂的电磁场环境中,如内部的功率器件、设备或器件之间的连接线、外部电网等都会对开关电源产生电磁干扰;同时,开关电源电路产生的谐波和辐射也会对其它设备和电网供电造成干扰,所以,对开关电源要限制由负载线、电源线产生的传导干扰、由辐射传播的电磁场干扰,使存在于同一电磁环境中的设备都可以正常工作,互不产生影响。开关电源的抗电磁干扰措施,一般是采用滤波、屏蔽、接地等技术,使开关电源的电磁干扰状况控制在其标准规定的范围之内。

关键词 :开关电源 (SPS),电磁兼容性 (EMC),电磁干扰 (EMI),标准,滤波,屏蔽

中图分类号:TN86 文献标识码:B 文章编号:1606-7517(2015)02-5-125

1 开关电源的电磁兼容性问题

电磁兼容是指电子电气设备在有限的空间、时间和频谱范围内正常工作的能力。电磁兼容通常包括电磁骚扰 (EMD) 和电磁敏感 (EMS) 两个方面的内容。电磁骚扰是指电气设备向外发出电磁噪声,电磁敏感是指电气产品抵制外来电磁骚扰的能力。电磁兼容性能良好的电子电气设备,应该是既不受周围电磁环境影响,也不会对周围的电子电气设备产生电磁噪音骚扰。

开关电源因具有体积小、重量轻、效率高、工作可靠以及可远程监控等优点,被广泛应用于多领域,而在多种应用场合,特别是通讯设备的应用,要求其具有很好的电磁兼容性能,如对浪涌、电网电压波动的适应能力,对静电、电场、磁场及电磁波等的抗干扰能力。所以,在开关电源的设计中,电磁兼容性是个非常重要的课题。

2 国内国际有关电磁兼容性的法规与标准

电子电气设备工作在非常复杂的电磁环境中,要彻底消除设备从外来的电磁干扰和其自身对外部的一切电磁干扰是不可能的,只能通过制定设备与设备之间允许产生的电磁干扰大小与抵抗电磁干扰的能力之标准,才能使电子电气设备及系统之间达到电磁兼容的要求。现在,国内国际制定了许多电磁兼容性标准,以此规范了电子电气设备电磁兼容性的约束条件。

研究电磁兼容性及制定相关标准的工作,可以追溯到上世纪三十年代。1934年,国际电工委员会 (IEC) 下属的国际无线电干扰特别委员会 (CISPR) 就是一个电磁兼容性标准化组,其设有6个分会,他们负责制订了有关电磁干扰测量接收机及测量方法的标准,如CISPR16《无线电干扰和抗干扰测量设备规范》对电磁兼容性测量接收机、辅助设备的性能以及校准方法给出了详细的要求与规定;CISPR17《无线电干扰滤波器及抑制元件的抑制特性测量》中规定了滤波器的测量方法,等等,不一一列举。

近几年中,IEC更出版了大量的基础电磁兼容性标准,其中最有影响的是IEC61000系列标准。它规定电子电气设备的雷击、浪涌、静电放电、电流谐波、电压跌落、电压瞬变及短时中断……,由射频电磁场引起的传导干扰抗扰度、传导干扰及辐射干扰等的电磁兼容性要求。美、德等国家都对通讯设备的电磁兼容性制定了要求。我国采用引进、消化、吸收的办法,也制订了一系列标准。

电磁干扰是个由来已久的问题,后来逐步形成综合性科学研究课题,为各国科技界重视,足可以说明其重要性。归纳起来,EMC法规具有以下重要意义:使电子设备可靠地工作,既不受外界电磁干扰的影响,也不影响其它设备的正常运行;电磁兼容是全球性课题,必须有国际化的规范;为了人身的安全和相关设备材料的安全。因为超过一定量值的电磁波会伤害人体器官,或与某些设备的

电路感应耦合引发爆炸；为当代和未来战争的需要。

3 开关电源电磁兼容性问题的原由

开关电源的 EMC 状况见图 1 所示。由图可见，电磁兼容有三个要素：干扰源、传播途径和受干扰体。开关电源工作在通断状态下，这就会引发复杂的电磁兼容性问题，所以，我们将从开关电源的组成结构来探究 EMC 问题。

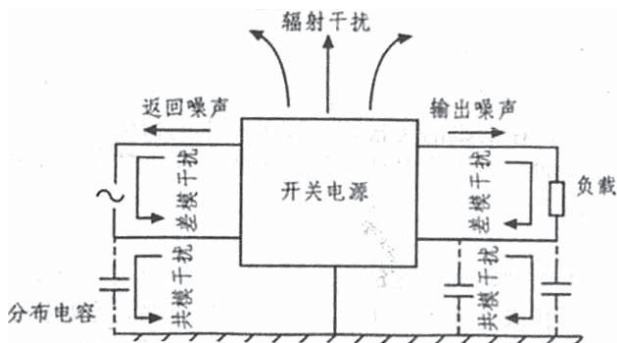


图1 开关电源的EMI类型

开关电源种类繁多，如按电路结构划分，则有串联式和直流变换式；若按激励方式可分为自激式和他激式；按开关管的组合可分为单管、全桥、半桥、推挽等等。然而，无论何种类型的开关电源，均是利用半导体器件作为开关，以通和断的时间比例来控制输出电压的高低。由于开关电源的工作频率都在几十至几百 kHz，故电路中的电流和电压变化率都很大，这就会产生很大的电磁干扰，它们将通过电源线以共模和差模的方式向外传输干扰，同时又向周围空间辐射干扰。现将主要产生机理概述如下。

a. 二极管的反射恢复电流产生干扰。高频整流回路中的整流二极管正向导通时有较大的正向电流流过，在其受反偏电压而转向截止时，由于 PN 结中有较多载流子积累，会在载流子消失之前的一段时间里产生电流的反向流动，致使载流子消失的反向恢复电流急剧减小而产生很大的电流变化和很高的尖峰电流。

b. 开关管产生的谐波干扰。功率开关管在导通时流过较大的脉冲电流。例如，正激型、推挽型和桥式变换器的输入电流波形在阻性负载时近似于矩形波，故其中含有丰富的谐波分量。当采用零电流、零电压开关时，这种谐波干扰是很小的。但在功率开关管截止期间，高频变压器绕组漏电感引起的电流突变则会产生尖峰干扰。

c. 交流输入回路产生的干扰。无工频变压器的开关电

源的输入端整流管，在反向恢复期间会引起高频衰减振荡而产生干扰。开关电源产生的尖峰干扰和谐波干扰能量，通过开关电源的输入、输出线传播出去而形成的干扰称其为传导干扰，而谐波和寄生振荡的能量通过输入、输出线传播时，都会在空间产生电、磁场。这种通过电磁辐射产生的干扰称之为辐射干扰。

d. 产生 EMI 还有一些其他因素，如电子元器件的寄生参数，印刷电路板 (PCB) 布线的随意性，电路设计的不够完善合理等等，其中 PCB 产生的近场干扰尤为突出，因为印刷电路板上放置、安装元件的位置、方向、高低等结构因素都会造成 EMI。另外，输入输出电源线布线的不合规范，检测电路设计不合理等因素都会导致系统工作不稳定，或降低对静电放电、快速瞬变脉冲群、雷击、浪涌及传导干扰、辐射干扰及辐射电磁场的抗干扰能力。

以上叙述了 EMC 的一般原由，但在具体解决电子设备的 EMI 时，需要进行具体的分析，得有明确的认识。例如，某探测设备的驱动电源采用直流斩波式方波交流电源驱动螺线管电磁铁往复运动，其驱动电源的负载为感性的电磁线圈，在斩波时将产生严重的电磁干扰。因为感性电磁线圈中的电流变化必然产生感应电动势，电流变化越快，产生的感应电动势越大，该感应电动势将通过某些路径传导耦合到放大器的输出级，从而产生严重的电磁干扰。而这种设备如改用线性纯正弦波电源驱动，则干扰即可大大减少。再则，要清楚地了解设备对电磁干扰可能的传播路径，从而在布线、接地和电磁屏蔽与隔离等方面采取措施，等等。

4 电磁兼容性设计

众所周知，电磁干扰源的种类繁多，在自然界的电磁干扰源就有：地球表面的磁场（其最大强度达 52A/m）、电场（其平均强度为 130V/m），大气中的雷电、静电的电晕放电、宇宙中星球的电磁噪声等；人为的电磁干扰源则有：如含有整流子的直流电机换向时产生的电弧和电流变化，电器开关动作时产生的电弧和电流变化，非线性元件工作时产生的谐波，高频振荡器和无线电发射设备的电磁辐射，汽车点火系统、医疗与工业用超声波发生器及生活中使用的微波炉、电磁炉产生的电磁脉冲等等。所以说，大自然中，电磁干扰源布满每个角落。

对于电磁兼容性的研究与认识，一般运用 CISPR16 及 IEC61000 中规定的电磁场检测仪器及各种干扰信号模拟

器、辅助设备,在标准测试场地或实验室内,通过详细测试分析并结合电路性能进行。电磁兼容性设计主要应把握三个要素:减小干扰源产生的干扰信号;切断干扰信号的传播途径;增强受干扰体的抗干扰能力。电源的电磁兼容性设计,需要综合考虑这三个方法,以成本效益比和实施难易为前提。

在电源的电磁兼容性设计中,目前抑制干扰的几个措施基本上都是用切断电磁干扰源和受干扰设备之间的耦合通道,也就是屏蔽、接地、滤波等常用方法。

4.1 采用屏蔽技术可以有效地抑制开关电源的电磁辐射干扰。例如,电源的功率开关管和输出二极管通常有较大的功率损耗,为了散热,往往需要安装散热器(大多数直接安装在电源底板上)。器件安装在底板上需要使用导热性能良好的绝缘片进行绝缘,这就会在器件、散热器、底板之间形成分布电容。开关电源的底板通常是交流电源的地线,为此,通过器件与底板之间的分布电容将电磁干扰信号耦合到交流输入端产生共模干扰具备了条件。这个问题的常用办法是采用两层绝缘片之间夹一层屏蔽片,并把屏蔽片接到直流地线上,这就切断了射频干扰向输入电网传播的途径。为了抑制开关电源产生的辐射电磁干扰对其它电子设备造成不良影响,可以完全采用对电磁场屏蔽的方法设计加工屏蔽罩,然后将整个屏蔽罩与系统的机壳和地连接为一体,这就能对电磁辐射进行良好有效的屏蔽。电源的某些部分与大地相连可以起到抑制干扰的作用,例如,静电屏蔽层接地可以抑制变化电场的干扰;电磁屏蔽用的导体原则上可以不接地,但是,不接地的屏蔽导体常常会增强静电耦合而产生所谓的“负静电屏蔽”效应,所以应以接地为优,这样可使电磁屏蔽同时发挥静电屏蔽的作用。电路的公共参考点与大地相连接可为信号回路提供稳定的参考电位。可见,系统中的安全保护地线、屏蔽接地和公共参考点地线各自形成接地母线后,最终都与大地相连。

4.2 在电路系统的设计中应遵循“一点接地”的原则。在电路系统中如果形成多点接地,则会出现闭合的接地环路,当磁力线穿过那些环路时会产生磁感应噪声。但实践中很难实现“一点接地”,因此,为降低接地阻抗,消除分布电容的影响而采用平面式或多点接地,利用一个导电平面(底板或多层印刷电路板电路中的导电平面层等)作为参考地,需要接地的各个部分就近接到该参考地上。为了

进一步减小接地回路的压降,可用旁路电容器减少返回电流的幅值。在低频和高频共存的电路系统中,应分别将低频电路、高频电路、功率电路的地线单独连接后再连接到公共参考点上。

4.3 滤波技术是抑制传导干扰的一种很好方法。例如,在电源输入端接上滤波器,可以抑制开关电源产生并向电网反馈的干扰,也可以抑制来自电网的噪声对电源本身的干扰侵害。在滤波电路中,还采用了多种专用滤波器元件如穿心电容器、三端电容器、铁氧体磁环等,以此可以有效改善电路的滤波特性。恰当地设计、选择和安装使用滤波器是抗干扰的重要组成部分。EMI滤波技术是一种抑制尖脉冲干扰。图2所示是一种由电容器、电感器组成的EMI滤波器,接在开关电源的输入端。图2电路中, C_1 、 C_5 是高频旁路电容,用于滤除两输入电源线之间的差模干扰; L_1 与 C_2 、 C_4 ; L_2 与 C_3 、 C_4 组成共模干扰滤波环节,用于滤除电源线与地之间非对称的共模干扰; L_3 、 L_4 的初级匝数相等、极性相反,交流电流在磁芯中产生的磁通相反,因此可以有效地抑制共模干扰。测试结果表明,只要选用的元器件参数适当,就可以较好地抑制开关电源产生的传导噪声。

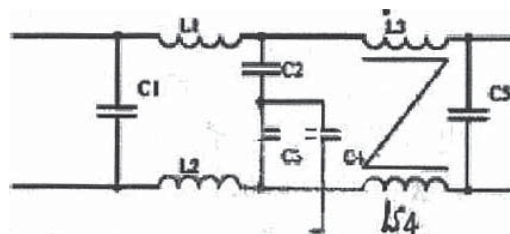


图2 EMI滤波器

4.4 对于开关电源产生的对外干扰,如电源线谐波电流、电源线传导干扰、电磁场辐射干扰等,一般用减小干扰源的方法解决。一方面,可以增强输入输出滤波电路设计,改善有源功率因数校正(APFC)电路的性能,减小开关管及整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。

对于来自外部干扰的抗干扰能力,如浪涌、雷击、应优化交流输入及直流输出端口的防雷能力。通常,对开路电压和短路电流组合的雷击波形,因其能量较小,可以采用氧化锌压敏电阻与气体放电管等组合的方法解决。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, 或选用具有抗静电干扰的器件来解决。快速瞬变信号含有很宽的频谱, 很容易用共模的方式传入控制电路内, 可采用防静电的相同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(如加入共模电容或插入损耗型铁氧体磁环等)来提高系统的抗干扰性能。

4.5 减小开关电源自身的内部干扰, 落实其自身的电磁兼容性, 提高开关电源的稳定性和可靠性, 可以从以下几个方面着手: 注意数字电路与模拟电路 PCB 布线的正确区分, 数字电路与模拟电路电源的正确去耦; 注意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干扰、减小地环影响; 布线时注意相邻线之间的间距及信号性质, 避免产生串扰; 减小地线阻抗; 减小高压大电流线路特别是变压器原边与开关管、电源滤波电容电路所包围的面积; 减小输出整流电路及续流二极管电路与直流滤波电路所包围的面积; 减小变压器的漏电感、滤波电感的分布电容; 采用谐振频率高的滤波电容器等。

4.6 开关电源 EMC 目前存在的不足与改进建议

上面论述了开关电源抑制 EMI 的主要措施大多数是从消除干扰源和受干扰设备之间的耦合和辐射, 切断电磁干扰的传播途径出发的。这些措施也确实是抑制电磁干扰的有效办法, 然而, 我们还应该在直接控制干扰源以消除干扰, 或提高受干扰设备的抗干扰能力等方面深入做工作, 这在电源电路设计中应做好以下几个方面。

(a) 在印制电路板 (PCB) 布局时, 应将模拟电路区和数字电路区合理地分开, 电源线 and 地线单独引出, 电源供给处汇集到一点。PCB 布线时, 高频数字信号线要用短线, 主要信号线最好集中在印刷电路板的中心, 同时电源线尽可能地远离高频数字信号线或用地线隔开。另外, 可以根据耦合系数来布线, 尽量减少干扰耦合。

(b) 印刷电路板的电源线和地线的印制线条尽可能宽, 以减小其阻抗, 从而减小公共阻抗引起的干扰噪声。

(c) 电路所用器件应多选用贴片式元件和尽可能缩短元件的引脚线长度, 以减少元件分布电感的影响。

(d) 在 V_{dd} 与 V_{cc} 电源端尽可能靠近器件接入滤波电容以缩短开关电流的流通过程, 如用 $10\mu\text{F}$ 的铝电解电容器和 $0.1\mu\text{F}$ 的电容器并联接在电源脚上。对于高速数字 IC

的电源端可以用钽电解电容器代替铝电解电容器, 因为钽电解电容器的对地阻抗比铝电解电容器的对地阻抗小得多。

5 开关电源电路的电磁兼容性 (EMC) 设计

以上, 我们着重从电源设备的结构、内外电磁场对电源产品 EMC 的影响作了介绍。在此叙述开关电源电路的 EMC 设计。

5.1 输入电路的电磁兼容性设计

图 3 所示为输入滤波电路, F_{V1} 为瞬态电压抑制二极管; R_{V1} 为压敏电阻, 其具有很强的瞬变浪涌吸收能力, 能很好地保护后级元器件或电路免遭浪涌电压的破坏; EMI 滤波器必须良好接地。且接地线要短, 最好直接安装在金属外壳上, 还要保证其输入线、输出线之间屏蔽隔离, 才能有效地切断传导干扰沿输入线的传播和辐射干扰沿空间传播。 L_1 与 C_1 组成低通滤波电路, 当 L_1 的电感值较大时, 还需增加 V_{D1} 和 R_1 形成续流回路, 吸收后级断开时 L_1 储存的能量, 否则, L_1 产生的电压尖峰就会形成电磁干扰。电感 L_1 所选用的磁芯最好为闭合磁芯, 带气隙的开环磁芯的漏磁场会形成电磁干扰。 C_1 的容量选较大值为好, 如此可以减小输入线上的纹波电压, 从而减小在输入导线周围形成的电磁场。

5.2 开关电源 EMI 滤波器基本电路设计

图 4 所示为开关电源 EMI 滤波器基本电路图。图中 C_{X1} 和 C_{X2} 是差模电容, L_1 、 L_2 是共模电感, 其匝数相同、绕向相反且绕在同一磁环上的两只独立线圈, 两只线圈内的电流产生的磁通在磁环内相互抵消。共模电感对工频电

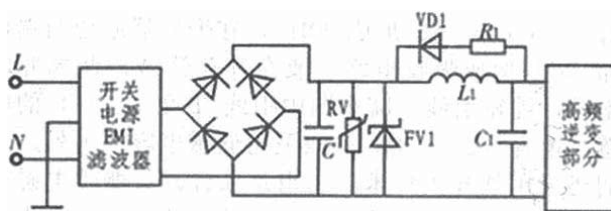


图3 输入滤波电路

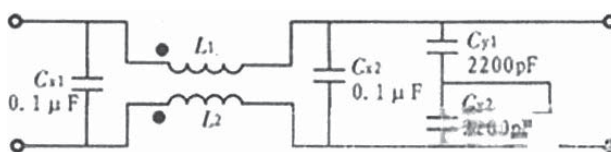


图4 开关电源 EMI 滤波电路

流不起任何阻碍作用，避免磁环达到磁饱和状态，从而使两只线圈的电感值保持不变。 C_{y1} 和 C_{y2} 是共模电容。差模滤波元件和共模滤波元件分别对差模干扰和共模干扰具有较强的衰减作用。在实际生产与使用中，由于绕制工艺技术会使共模电感两绕组存在电感值差，不过这个差值正好被利用来做为差模电感。为此，一般电路设计中不需要再设置独立的差模电感。共模电感的差值电感与电容 C_{x1} 和 C_{x2} 构成一个 π 型滤波器。这种滤波器对差模干扰信号有较好的衰减。

电容 C_{y1} 和 C_{y2} 是用作滤除共模干扰的。共模干扰的衰减在低频时主要由电感器起作用，而在高频时大部分由电容 C_{y1} 和 C_{y2} 起作用。 C_{y1} 接于电源线和地线之间，需要其具有耐高压和低漏电流特性； C_{y2} 一般用 2.2~33 μF 电容值的陶瓷片式电容器。

差模电容 C_x 接在两根电源线之间，其对一般的高频干扰的阻抗很低，故两根电源线之间的高频干扰可以通过它，而它对工频信号的阻抗很高，所以对工频信号的传输毫无影响。 C_x 电容器的选择，主要是考虑其耐压值，只要能满足功率电路的耐压等级，能承受可以预料的电压冲击即可。为了避免放电电流引起的冲击危害， C_x 的电容量不宜过大，一般在 0.01~0.1 μF 之间，电容器的类型为陶瓷电容器或聚酯薄膜电容器。

5.3 高频逆变电路的电磁兼容性设计

图 5 所示为一种高频逆变电路。VT 是 MOSFET 的开关器件，在 VT 导通或断开时，由于开关动作时间很短以及引线电感、变压器漏感的存在，回路会产生较高的 di/dt 、 du/dt 而形成电磁干扰；在变压器原边的两端增加 RCD 构成吸收电路，或在开关管 VT 两端并联电容器，并缩短

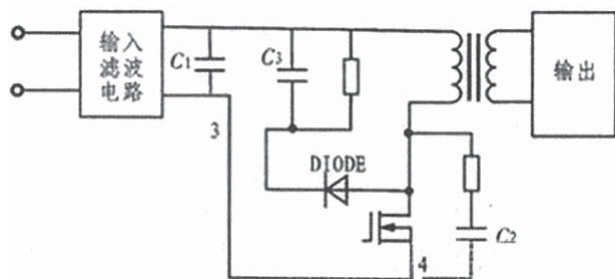


图5 高频逆变电路

引线长度，减小图中所示的 1-2、3-4 的电感值。电容 C_2 、 C_3 一般采用低感电容器。另外，还采用了软开关技术，这也是改善开关器件电磁兼容特性的一种重要方法，这是因为开关器件通断时会产生浪涌电源 di/dt 及尖峰电压 du/dt ，这是开关器件产生 EMI 及损耗的主要原因。软开关技术使开关管在零电压、零电流状态下进行开关转换，可以有效地抑制 EMI，改善开关电源的电磁兼容特性。

5.4 输出整流电路的电磁兼容性设计

图 6 所示为输出整流电路。图中， V_{D6} 是整流二极管， V_{D7} 是续流二极管。这两只二极管工作于高频开关状态，所以它们是输出整流电路的电磁干扰源。 R_5 、 C_{12} 和 R_6 、 C_{13} 是高频整流二极管 V_{D6} 、 V_{D7} 的吸收电路，可以吸收 V_{D6} 、 V_{D7} 开关时产生的电压尖峰，改善开关电源的电磁兼容特性。减少高频整流二极管的数量即可减少 EMI 能量，所以在满足同样条件下，采用半波整流要比采用全波整流和全桥整流产生的电磁干扰信号小。此外，在输出电压较低的情况下，采用肖特基二极管产生的电磁干扰也比采用其它二极管小些。

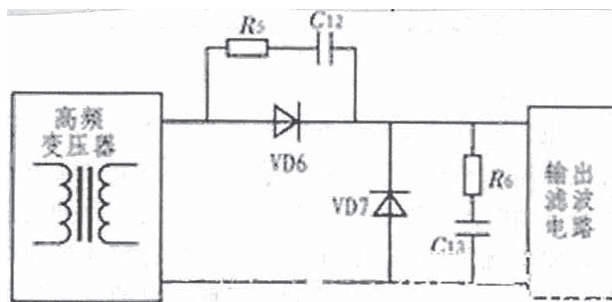


图6 输出整流电路

6 小结

开关电源的电磁兼容与电磁干扰问题是其能否稳定可靠工作的关键因素，影响其广泛使用。文章简要介绍了开关电源 EMC/EMI 的一些概念和产生的原因，指出了减小或消除 EMI 的一些有效方法，推介了若干开关电源电路的 EMC 设计例子。实践证明，开关电源的 EMC 特性研究远远没有完成。全面有效抑制开关电源的各种电磁干扰和进行 EMC 设计，将使开关电源得到更广泛应用。

（参考资料 略）