

开关电源电磁干扰抑制与滤波电路改进实践分析

王 玺

邢台市财政干部教育中心, 河北 邢台 054000

[摘要]文中聚焦于开关电源电磁干扰抑制、滤波电路改进工作展开研究。主要是对开关电源运行时段传导干扰、辐射干扰、共模干扰、差模干扰的形成机理予以剖析,同时探讨滤波电路优化、器件参数匹配、PCB布局改进、系统级电磁兼容设计途径。文章运用文献归纳、理论分析、工程实践总结相结合的方式,从干扰源识别、传播路径控制、滤波电路设计、整改调试方法、可靠性保障等多个方面展开论述。研究发现,开关电源电磁干扰主要是由高频开关动作、寄生参数耦合、回路面积过大、接地不合理、滤波器匹配不足等诸多因素所引发。借助优化输入输出滤波网络、合理配置共模电感与差模电感、改进X/Y电容参数、增添吸收缓冲电路、完善接地屏蔽、布线设计,能够切实降低噪声幅值并且提高电磁兼容水平。结论表明,滤波电路改进无法单独进行,应当与开关器件选择、拓扑结构、热设计、安规要求、测试验证共同推进。

[关键词]开关电源;电磁干扰;滤波电路;共模干扰;电磁兼容

DOI: 10.33142/ec.v9i8.20215

中图分类号: TN710

文献标识码: A

Practical Analysis of Electromagnetic Interference Suppression and Filter Circuit Improvement in Switching Power Supply

WANG Xi

Xingtai Financial Cadre Education Center, Xingtai, Hebei, 054000, China

Abstract: This article focuses on the research of electromagnetic interference suppression and improvement of filtering circuits in switching power supplies. The main focus is to analyze the formation mechanisms of conducted interference, radiated interference, common mode interference, and differential mode interference during the operation of switch mode power supplies, and to explore the optimization of filtering circuits, device parameter matching, PCB layout improvement, and system level electromagnetic compatibility design approaches. The article combines literature review, theoretical analysis, and engineering practice to discuss interference source identification, propagation path control, filter circuit design, rectification and debugging methods, reliability assurance, and other aspects. Research has found that electromagnetic interference in switching power supplies is mainly caused by various factors such as high-frequency switching actions, parasitic parameter coupling, large circuit area, unreasonable grounding, and insufficient filter matching. By optimizing the input-output filtering network, reasonably configuring common mode and differential mode inductors, improving X/Y capacitor parameters, adding absorption buffer circuits, improving grounding shielding, and wiring design, it is possible to effectively reduce noise amplitude and improve electromagnetic compatibility. The conclusion indicates that the improvement of the filtering circuit cannot be carried out alone, and should be promoted together with the selection of switching devices, topology structure, thermal design, safety requirements, and testing verification.

Keywords: switching power supply; electromagnetic interference; filter circuit; common mode interference; electromagnetic compatibility

引言

开关电源凭借其具备的高效率、小体积、良好的适应性等特点,在通信领域、工业控制领域、消费电子领域、新能源设备当中都有着广泛的应用。然而,因其高频开关特性,会生成比较强烈的电磁干扰,进而对设备的稳定运

行、周边电子系统的安全产生一定影响。伴随电子产品集成度不断提高,电磁兼容方面的要求越发严格,以往传统的基于经验式的滤波设计已经很难满足当下复杂应用的需求。对于开关电源电磁干扰抑制、滤波电路改进展开研究,能够在一定程度上提高电源产品的可靠性、兼容性、

工程应用质量。

1 开关电源电磁干扰的形成机理

1.1 高频开关动作引起的干扰源

开关电源依靠功率开关器件以周期性的方式导通和关断来达成电能的变换。开关管、电感、变压器、整流二极管都是在高频状态下运行的,此时电压和电流的变化率相对较高。在开关器件快速关断之际,回路里的寄生电感会产生尖峰电压,而当器件快速导通的时候,结电容、绕组电容、布线电容又会形成瞬态电流。这些快速变动的电压和电流就是电磁干扰的主要来源。特别是在高频化与小型化的设计趋势当中,开关频率的提高虽有助于缩小磁性元件的体积,然而却会让高频噪声的频谱范围得以扩大,进而增加了滤波、屏蔽的难度。所以,识别高频开关节点、尖峰电流回路、高 dv/dt 区域,乃是实现干扰抑制的基础所在。

1.2 寄生参数与耦合路径的影响

开关电源当中的寄生参数是无法避免的,像器件引脚电感、PCB 走线电感、变压器分布电容、散热片对地电容还有绕组间电容等都属于寄生参数。这些寄生参数会对理想电路的运行状态产生改变,致使高频噪声借助传导、容性耦合、感性耦合、空间辐射等途径进行扩散。输入线、输出线、外壳、接地线、控制信号线都有成为干扰传播路径的可能性。要是功率回路的面积比较大,磁场辐射就会增强,要是高频节点距离敏感控制电路较近,就容易导致控制出现误动作,要是二次侧和一次侧之间的分布电容比较大,共模噪声就会通过隔离变压器耦合到输出端。电磁干扰并非是单一器件的问题,而是电路结构、空间布局、寄生参数共同作用所产生的结果。

2 开关电源电磁干扰抑制的基本思路

2.1 从干扰源头降低噪声强度

电磁干扰抑制需要先从源头着手,而非仅仅依靠后级滤波。降低开关噪声能够借助选择恰当的开关频率、控制驱动速度、优化功率器件参数、采用软开关技术来达成。开关速度要是过快,就会使尖峰和振铃增多,要是过慢,又会让开关损耗和温升增加,所以驱动电阻应当依据效率、温度、电磁兼容的要求进行折中选取。针对二极管反向恢复引发的噪声,可以采用快恢复二极管、肖特基二极管或者同步整流方案。对于变压器漏感导致的尖峰,能够增加 RCD 吸收、TVS 钳位或者有源钳位电路。源头控制拥有减少滤波器压力、提高整体设计效率的优势。

2.2 从传播路径阻断噪声扩散

电磁干扰能不能对外部设备产生影响,这要看噪声传

播的路径是不是畅通无阻。在开关电源设计的时候,要尽可能把高频电流回路缩短,让环路面积变小,使寄生电感降低。输入滤波器要靠近电源的入口处,防止滤波前后的线路之间出现相互耦合的情况,功率回路和控制回路需要分区来布置,敏感的信号线要离开节点和磁性元件远一些,一次侧高频地和低频地要合理地连接,避免噪声电流经过控制基准地。对于隔离式电源而言,可以借助变压器屏蔽层、合理的接地、Y 电容配置等方式来控制共模噪声路径。传播路径控制所展现的是系统级思维,只有清楚噪声是从什么地方产生的、沿着什么地方传播、在什么地方被检测到,整改措施才能具备针对性。

2.3 从受扰对象提升抗干扰能力

电磁兼容一方面要降低干扰发射,另一方面要提高系统抗扰能力。开关电源的内部控制芯片、反馈环路、采样电阻、光耦、基准源等部位对噪声比较敏感,要是抗干扰能力不够,就可能出现输出纹波增大、启动异常、保护误动作、负载响应变差等问题。提高抗扰能力能够通过增加控制电源去耦、优化采样滤波、缩短反馈走线、采用差分采样还有改善接地方式来达成。对于外部接口,需要加强浪涌、静电、快速脉冲群、射频场抗扰设计。抗扰设计和发射抑制彼此补充,能够提高开关电源在复杂电磁环境里的长期稳定性。

3 滤波电路设计与改进要点

3.1 输入 EMI 滤波器参数优化

EMI 滤波器作为开关电源传导干扰抑制的关键部分,一般由共模电感、差模电感、X 电容、Y 电容、泄放电阻构成。进行设计的时候,需要依据干扰频段、输入电压等级、安规标准、漏电流限制、空间成本来确定参数。X 电容主要起到抑制差模噪声的作用,要是增大其容量,能够提高低频段的滤波效果,不过这样会增加浪涌电流、泄放方面的要求,Y 电容是用来给共模噪声提供回流路径的,然而其容量受到漏电流、安规的限制,不可以随意增大。对于共模电感来说,要关注额定电流、阻抗频率特性、磁芯材料、饱和特性。当差模滤波不足时,可以增加差模电感,或者利用共模电感的漏感来辅助抑制。针对输入滤波器的改进,应当结合实测的噪声频谱来进行,而不是仅仅依靠经验进行选型。

3.2 输出滤波与纹波噪声控制

输出滤波的主要作用在于降低输出电压纹波、高频尖峰,通常会采用电感、电容、 π 型滤波、低 ESR 电容的组合方式。输出滤波电容的容量、等效串联电阻、等效串联电感,会对纹波幅度、瞬态响应、环路稳定性产生影响。

低 ESR 电容利于降低纹波, 不过也有可能改变控制环路零极点的分布情况, 进而致使系统稳定裕度下降。所以说, 对输出滤波进行改进时不能仅仅追求电容容量增大, 还应当配合环路补偿设计才行。针对高频尖峰, 能够在整流器件两端增添 RC 吸收, 在输出端添加磁珠或者小容量陶瓷电容。要是输出线比较长, 还需要考虑线缆辐射、负载端去耦问题。输出滤波的目标是要兼顾纹波、动态响应、稳定性、电磁兼容。

3.3 阻尼与谐振抑制设计

滤波器是由电感、电容组合而成的, 这样的结构自然就存在产生谐振的可能性。要是滤波器的阻尼不够充足的话, 那么在某些频段就有可能出现噪声放大的情况, 进而使得整改之后的测试结果反倒不如之前。输入滤波器跟电源负阻抗特性之间也会相互产生作用, 最终引发低频振荡或者启动异常的问题。所以说, 在对滤波电路进行改进的时候要留意阻尼设计。比较常用的办法有, 在电容上串联小电阻, 在电感上并联阻尼网络, 采用 RC 吸收网络, 或者选用具有适当等效串联电阻 (ESR) 的电容。在进行阻尼设计时, 要防止过度增加损耗、温升, 与此同时还要确保滤波器在目标频段具备足够的插入损耗。借助频谱测试、阻抗分析, 能够判断噪声峰值是不是由滤波器谐振所造成的, 然后依据这个来调整参数。

4 开关电源滤波电路改进实践路径

4.1 基于测试结果定位干扰频段

对于滤波电路的改进工作而言, 其应当以测试诊断作为基础来进行。在进行传导干扰测试的时候, 可以借助人工电源网络、频谱分析仪或者接收机来获取噪声频谱, 进而依据噪声的分布情况对主要的问题频段进行判断。要是低频段出现超标现象, 一般来说是与开关基波及其低次谐波、输入电流脉动或者差模滤波不足存在关联, 要是高频段出现超标情况, 那么有可能是和共模耦合、器件振铃、布局寄生参数、线缆辐射有关系。通过将共模和差模噪声分离开来, 能够进一步明确滤波的方向。在整改过程中, 不适合一次性更换大量的器件, 不然很难判断出有效的措施。更为合理的做法是逐个调整参数, 同时记录频谱的变化情况, 以此来建立噪声源、滤波器件、测试结果之间的对应关系。

4.2 优化 PCB 布局与接地结构

滤波器件参数准确无误并不等同于滤波效果必定理想, PCB 布局对于高频滤波性能有着重要影响。输入滤波器应当靠近电源入口进行布置, 滤波之前的线路与滤波

之后的线路要保持一定距离, 目的是防止噪声越过滤波器直接耦合到输入端。高频电流回路应当尽可能短且粗, 开关管、变压器、整流器、输入旁路电容之间要形成紧密回路。功率地、控制地、安全地应按照电路结构合理划分区域并进行单点连接, 防止大电流脉冲进入敏感的控制地。Y 电容的接地地点要靠近噪声回流路径, 机壳地的连接要保证低阻且可靠。对于多层板设计而言, 可以借助完整的地平面来降低回流阻抗, 但要避免高 dv/dt 节点进行大面积铺铜而造成额外的寄生电容。布局的改进常常比单纯增加滤波元件更为有效。

4.3 吸收缓冲与屏蔽措施协同应用

在噪声主要源于开关节点振铃、变压器漏感或者整流二极管反向恢复的情况下, 仅仅依靠输入滤波器或许很难实现有效抑制。这个时候应当在噪声源附近增添吸收缓冲电路, 像是 RC 吸收、RCD 钳位、TVS 保护或者有源钳位等。吸收电路能够使尖峰幅值、振铃能量降低, 进而减少噪声向外传播。针对变压器耦合引发的共模干扰, 可以采用绕组间屏蔽层并且进行合理接地。对于空间辐射比较强的结构, 能够借助金属屏蔽罩、磁性元件合理摆放、线缆屏蔽来降低辐射。屏蔽必须配合良好接地, 不然有可能形成悬浮导体并产生新的耦合路径。

5 电磁干扰抑制与滤波电路改进的保障机制

5.1 兼顾安规、效率和可靠性要求

开关电源滤波电路的改进需要满足安规、可靠性方面的要求。X 电容跟 Y 电容应选用符合安全认证的器件, 其耐压等级、阻燃等级、漏电流都要符合应用场景的要求才行。对于共模电感和差模电感来说, 要考虑温升、饱和电流、绝缘性能, 防止在额定工况下出现参数失效的情况。增加吸收电路会消耗一定的能量, 有可能降低效率并且增加局部发热, 所以要进行热评估工作。滤波电容容量增大或许能改善噪声, 但是可能会使浪涌电流上升, 进而影响整流桥、保险丝、NTC 器件的寿命。

5.2 建立系统化测试验证流程

滤波电路改进完毕后进行系统化验证。除传导干扰、辐射干扰测试之外, 输入电压范围、负载变化、温度变化还有批量器件偏差对整改效果的影响也要予以关注。不同负载条件下噪声频谱会有差异, 轻载、满载、动态负载都需要进行测试。对于需满足相关电磁兼容标准的产品, 要在预一致性测试阶段尽早发现问题, 在正式认证前完成整改工作。测试过程中要记录滤波器件型号、参数、布局变化、频谱结果, 形成可追溯资料。系统化测试能够帮助避

免“实验室偶然通过、批量生产不稳定”这类问题。

5.3 推动设计前置与协同开发

开关电源电磁干扰整改进行得越晚,所需成本就会越高。比较理想的做法是,在产品设计的最初阶段就着手进行电磁兼容规划,这其中涵盖了拓扑选择、频率设定、器件封装、磁性元件结构、PCB 分区、接口滤波、接地方案等方面。硬件工程师、结构工程师、安规工程师、测试人员需要协同起来进行工作,防止电路设计、结构屏蔽、认证测试出现相互脱节的情况。对于模块化电源或者高功率密度产品而言,在样机阶段进行频谱分析、热电联合评估就显得更为必要。设计前置可以减少后期堆料式整改,进而提高产品开发效率。从长期来看,企业还应当建立滤波器件库、典型噪声问题库、整改经验库,以此为后续产品迭代提供相应依据。

6 结论

开关电源电磁干扰抑制、滤波电路改进属于一项系统性的工程,它涵盖了许多环节,如干扰源控制、传播路径阻断、滤波器参数设计、PCB 布局优化、接地屏蔽、测试验证等。有研究显示,开关电源的干扰主要源自高频开

关动作、器件寄生参数、回路面积过大、共模耦合路径不合理等情况。对滤波电路进行改进的时候,应当先把共模干扰和差模干扰区分开来,之后依据实际的频谱特征去选择共模电感、差模电感、X/Y 电容、RC 吸收、屏蔽接地等措施。输入滤波器能够让传导发射降低,输出滤波器能够让纹波、负载端噪声得到改善,而吸收缓冲电路则可以从源头之处降低尖峰和振铃。在工程实践当中,仅仅是单纯地增加滤波元件并不一定就会有效果,甚至还可能引发谐振、温升、漏电流、成本方面的问题。

[参考文献]

- [1]张占松,蔡宣三.开关电源的原理与设计[M].北京:电子工业出版社,2004.
 - [2]沙占友.开关电源设计入门与实例剖析[M].北京:中国电力出版社,2010.
 - [3]钱照明,张军明,吕征宇.电力电子系统电磁兼容设计基础及干扰抑制技术[J].电工技术学报,2004,19(10):1-7.
- 作者简介:王玺(1989—),男,汉族,河北邢台人,工程师,河北科技师范学院毕业,现就职于邢台市财政干部教育中心,从事财政科研工作。