

LI Zhensen, XU Junming*, SUN Feng

(Institute of Electronic Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310037, China)

Abstract: Electromagnetic interference in high-PF flyback switching power supply is analyzed. EMI filter is designed to achieve EMC of Switching power supply. On the discussion of principles of EMI filter design, effect of high-frequency distribution parameters on the frequency characteristics of filter is determined. Design and adjustment of filter on their structures and parameters can effectively suppress conducted interference and help flyback switching power supply with high-PF to meet the EMI standard of lamps.

Key words: EMC; EMI filter; single-stage PFC; power supply

EEACC: 1210

高功率因数反激式开关电源的电磁兼容研究*

李振森, 徐军明*, 孙峰

(杭州电子科技大学电子信息学院, 杭州 310037)

摘要: 对带有高 PF(功率因数)反激式的开关电源的电磁干扰进行了分析。为实现开关电源的 EMC(电磁兼容), 在设计过程中采用了 EMI 滤波器。在探讨 EMI 滤波器的设计原则基础上, 分析了高频分布参数对滤波器频率特性的影响, 通过设计和调整滤波器的结构及器件参数, 实现了 EMI 传导干扰的有效抑制, 使带有高 PF 反激式的开关电源达到灯具的 EMI 标准。

关键词: EMC; EMI 滤波器; 单级 PFC; 开关电源

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2009)04-0824-04

大功率 LED 用于普通照明是本世纪的新课题, LED 的综合优势将引发下一轮照明技术的革命, LED 驱动电路的研究是其中的关键技术之一, 工程师希望为 LED 开发出高可靠低成本单级 PFC 反激式 LED 驱动电路。该驱动电源具有结构简单, 体积小, 成本低廉等特点, 可以更好地满足 LED 的广泛应用, 从而成为目前的一个发展方向。由于该电源是简单的单级结构, 器件承受着很大的电压电流应力, 导致 EMI 干扰强, 输出纹波大、输出滤波电容大等缺点, EMC 较难设计和通过^[1]。本文针对该电源的器件布局、PCB 的设计, EMI 滤波器设计进行了深入的研究, 实现了该电源的 EMC 设计。

1 高 PF 反激式开关电源传导干扰分析

图 1 是为我们实验室为 LED 设计的单级 PFC 反激式 30 W LED 驱动电源。宽范围输入电压 V_{AC} 为 88~264V、输出电压为 15 V、 I 为 2A, 控制芯片采用 L6561, 恒流限压反馈回路用 LM358 实现, 采用隔离变压器。在电路中存在一些电压电流剧变的节点, 主要集中在 MOSFET 器件 V_1 、整流二极管 D_1 、高频变压器 T_1 。这些节点的电压电流包含强度很高的高频成分, 比如变压器的漏感和输出整流二极管的反向恢复电流造成的尖峰, 都形成了潜在的电磁干扰。这些节点是电源电路中的传导干扰源, 它们作用于电路中的对地杂散电容产生共模噪声电

收稿日期: 2009-06-04 修改日期: 2009-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助(60671024); 浙江省自然科学基金资助(Y107255)

作者简介: 李振森(1983-), 男, 杭州电子科技大学在读硕士研究生, 微电子学与固体电子学专业, 从事 LED 驱动的研究, lzs03068315@163.com

徐军明(1976-), 男, 副教授, 杭州电子科技大学硕士生导师, 研究方向新型材料与器件, 抗电磁干扰技术。

流,共模干扰对驱动电源的 EMI 传导干扰的贡献较大,主要引起中高频段的干扰,对共模传导干扰的抑制是电源 EMC 设计中的难点。电路中对 EMI 影响较大的对地杂散电容如图 1 所示,主要有功率 MOSFET 管 V_1 漏极对地的寄生电容 C_4 ; 变压器 T_1 的初级对次级的寄生电容 C_1 ; 变压器的次级回路对地的寄生电容 C_6 ; 变压器初、次级绕组对磁芯的寄生电容 C_2 、 C_3 以及变压器磁芯对地的寄生电容 C_5 。

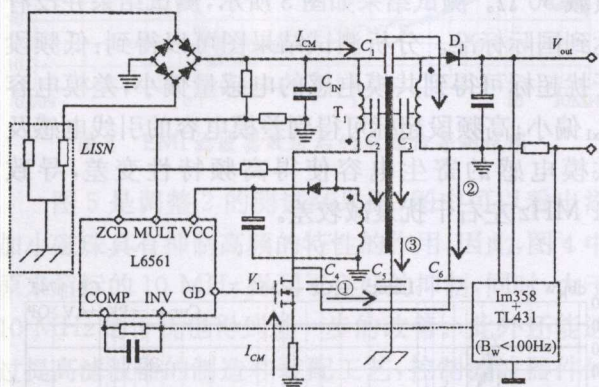


图 1 电源的主要的共模传导干扰图

共模电流 I_{CM} 在电路中的耦合途径如图 1 所示,主要有 3 条:① 从噪声源到 V_1 漏极并通过 C_4 耦合到地;② 从噪声源通过 C_1 耦合到变压器 T_1 次级电路,再通过 C_6 耦合到地;③ 从 T_1 的初、次级线圈通过 C_2 、 C_3 耦合到 T_1 的磁芯,再通过 C_5 耦合到地^[2]。由于这些寄生电容难以消除,只能通过优化电路结构及提高变压器工艺,降低寄生电容导致的电磁干扰。

2 电源的整体 EMC 设计

2.1 高 PF 反激式开关电源的 EMC 设计

解决 EMC 问题不能仅依赖于 EMI 滤波器,在开关电源设计初期需要考虑,如在次级输出端可以使用 SiC 整流二极管可以提高效率,但其造成的 EMI 干扰较大,因而在我们的开关电源设计中没有采用。在设计过程中,还进行了如下一些考虑来提高开关电源的 EMC。

① 电压电流剧变节点采用吸收回路 在 MOS 管漏极回路串联 RCD 箝位吸收回路,在次级的整流二极管两端添加 RC 吸收电路,利用吸收回路降低干扰。

② 变压器采用屏蔽层 在变压器中初级绕组和次级绕组添加了屏蔽层以减少由于变压器漏磁引起的 EMI 噪声;把变压器的屏蔽层的接向强电的地端减小从变压器初级绕组传递到次级绕组的共模电流。

变压器可以采用三明治绕法以增强耦合性,但是考虑到三明治绕法的变压器批量生产困难而没有采用。

③ 添加旁路去耦电容及高频滤波电容 在变压器的初级输入端、次级输出端及辅助绕组的输出节点添加旁路耦合电容,可以吸收掉高频器件在电源板上引起的高频辐射噪声。在控制芯片 L6561 的 V_{cc} 和强电地之间加去耦电容,为芯片提供从电源到地的动态低阻抗通路,减小从电源获取高速电流时局部产生的电压降。这种设计减小了高变化率电流流通的导线长度,从而降低了高速电流电磁辐射强度。电源的输入端添加 EMI 滤波器,输出端采用高频电解电容,每个电解电容都并联了一个 $0.1 \mu\text{F}$ CBB 电容。在高压地和地压地添加了隔离 4700 pF 的 Y 电容,降低变压器的 EMI 干扰^[3]。

④ PCB 的 EMC 设计 减小有变压器初级绕组、MOSFET 和电流采样电阻的组成的高频电流回路面积、减小变压器次级输出电路的高频电流环路面积。电源的电路 PCB 的主要连接线都尽可能地做到了短而直、宽度适合、尽量缩小了高频回路的面积。芯片 L6561 与 MOSFET 的距离约是 8 mm ;尽量使用了贴片器件,集成器件以紧缩布线空间;注意了吸收回路的布板及器件之间的相互影响。最终的 PCB 做得比较小,高频特性较好。PCB 为长方形,长宽比大约为 $4:1$,那些相互影响的走线及可能干扰比较大走线均做了远离、隔离处理。器件的布局考虑到了铁氧体器件的使用,预留小磁珠空间以备按需加减。芯片外围电路器件合理有序地分布在芯片的周围,提高了驱动电路的抗干扰能力。

2.2 高 PF 反激式开关电源输入 EMI 滤波器设计

EMI 滤波器在 EMC 设计中有非常重要的地位,可以进一步提高开关电源的 EMC。图 2 是设计的电源 EMI 滤波器电路图,在 EMI 滤波器的设计与选择过程中,综合考虑了干扰源的干扰特性强、频率范围宽、工作电压宽、阻抗等参数及负载特性的要求,具体设计如下:

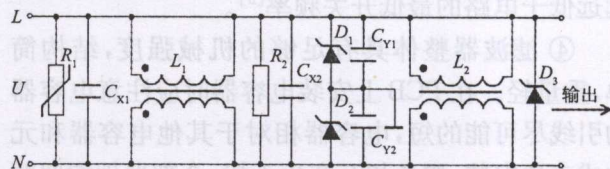


图 2 EMI 滤波器的结构图

① 由于开关电源的电磁干扰比较强,以及单级共模滤波衰减有限,设计采用两级共模电感 L_1 、 L_2 滤波。共模电感的两个线圈匝数相等,电感对电路的差模电流和工作电流不起作用,而对共模干扰信

号呈现高阻抗,具有明显的滤波效果。由于一些因素的存在,如磁芯的材料无法做到绝对均匀,两个线圈的绕制也不完全对称等,使得电感量很难绝对相等,于是(L_1-L_2)形成差模电感,差模电感和差模电容 C_{X1} 、 C_{X2} 组成低通滤波器可以抑制电源线上的差模干扰,因此电路中不需另外添加差模电感。两级共模电感可以获得比单级更高更好的衰减,可以获得频带更宽的抑制特性^[4]。

② EMI 滤波器差模电容使用 X 安规电容,安全等级 X2,耐压 2 500 V。共模电容使用 4 700 pF 的安规 Y 电容,安全等级 Y2,耐压 400 V。开关电源工作在 88~275 V 交流输入时具有安全的耐压值,耐压和漏电流均符合安全要求。为了应对输入瞬间高压的冲击(如闪电)保护电源,添加抗雷击浪涌器件压敏电阻 R_1 、TVS 管 D_1 、 D_2 、 D_3 ,用以抗击较强的雷击浪涌, R_2 是 1206 封装的 1.5 M Ω 两颗串联的贴片电阻用作泻放电阻,用于消除在滤波器中出现的静电积累。EMI 滤波器的器件不论电气和机械性能上,都具有足够的安全裕量。

③ 论文所设计的开关电源中的 MOEFET 的开关频率在 25~60 kHz,在低频段会有很强的干扰。衰减低频段共模干扰需要较大的共模电感。

针对 30 W 开关电源,滤波器用磁芯需考虑低频干扰强、流过电流较小、共模电感较大等特点,选择采用磁导率为 8K 锰锌磁环。由于该电源用于 LED 的驱动,LED 发热量较多,滤波器也有温升,如温升较高容易影响滤波器性能,还会影响 LED 的寿命,要降低温升,因此电流密度按照 4 A/mm² 进行设计。由导线横截面积

$$S = 0.25\pi D^2$$

计算出导线直径 0.366 mm,漆包线采用了 $\Phi 0.37$ mm。兼顾滤波器的体积、等效电阻等,磁芯尺寸最终确定为外 $\Phi 14$ mm、内 $\Phi 8$ mm、高 7.5 mm。为避免磁芯的饱和,按饱和磁通密度 60% 设计,得到滤波器的谐振频率为 2 kHz 左右,远远低于电路的最低开关频率^[5]。

④ 滤波器整体具有足够的机械强度,结构简单,重量轻。在 PCB 上安装电容器时应注意电容器的引线尽可能的短,电容器相对于其他电容器和元件成直角安装,避免相互产生干扰,全部器件按照顺序分布以免交叉以致相互干扰。

⑤ 保证 EMI 滤波器与散热板和地的接触良好,否则,EMI 滤波器将不能完成滤波功能,同时它是一个电磁辐射体,会影响电源的正常工作。电源按照要求装了 2 mm 厚的铝合金板屏蔽壳以抑制电

源的辐射干扰^[6]。

3 测试及分析

针对基于 L6561 和 lm358 单级 PFC 反激 30 W LED 开关电源进行了测试分析,测试依据国标 GB17743 灯具产品的 EMI 标准。测试仪器采用杭州伏达测试研究所 EMC300A 接收机,EMC200A 测试网络,其 10~130 kHz 频带分辨率 200 Hz,130 kHz~30 MHz 频带分辨率 10 kHz,干扰信号接收负载 50 Ω 。测试结果如图 3 所示,测试结果并没有达到国际标准。分析测试结果图可以得到:低频段干扰超标可得到共模电感的电感量偏小,差模电容 C_{X1} 偏小;高频段超标可得到差模电容的引线电感及共模电感的寄生电容使得高频特性变差,导致 11 MHz 左右干扰衰减较差。

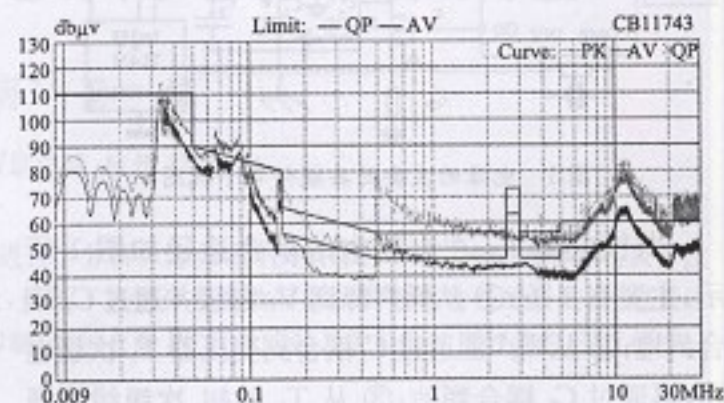


图3 电源的初次传导干扰测试图

根据以上测试结果对电感和电容的参数进行了调整,具体的调整过程如表 1 中的调整 1,调整 2 是在调整 1 的基础上再串接磁珠。

表 1 EMI 滤波器器件参数表

参数	L_1, L_2 /mH	C_{X1} / μ F	C_{X2} / μ F	$C_{Y1, Y2}$ /pF	接地
初始	20	0.33	0	4700	直接
调整 1	40	0.47	0.1	4700	直接
调整 2	40	0.47	0.1	4700	串接磁珠

图 4 是调整 1 的测试结果图,图中可以看出:在添加了一个 0.1 μ F 差模电容 C_{X2} ,差模电容 C_{X1} 增加到 0.47 μ F,共模电感到 40 mH 后,低频段衰减到国标以下,有 15 dB 以上的裕量,在中频段和高频段除 10 MHz 左右外基本满足要求。由于电感的加大,磁芯没变,电感的分布电容增大;电容的增加,添加电容引线较长造成高频分布电感的增加,导致原高频段 11 MHz 左右的衰减很小且向低频段偏移到 10 MHz,同时也说明了电容越小频率特性越好。当电感电容已经较大后,不适宜再增加共模电容,容

量过大会造成频率特性变差;差模电容也不宜再增大,会降低造成安全性,且电容增大对高频段衰减效果有限,可能会恶化高频段,

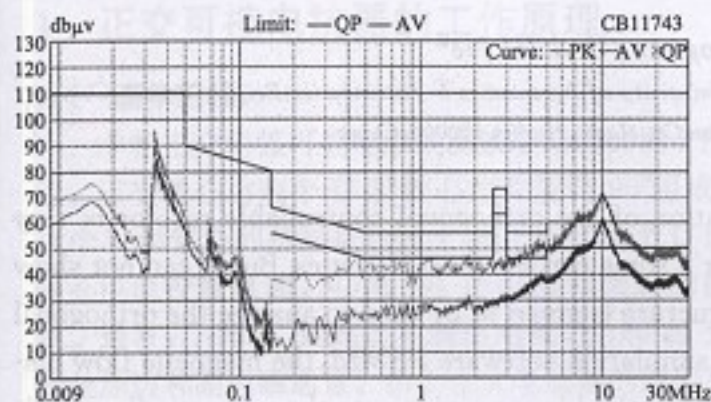


图4 EMI滤波器改进后的电源传导测试图

图5是调整2的测试结果图,图中可以看出添加小磁珠具有抑制高频的特性的作用,因此,图4中原来超标的10 MHz得到了良好的抑制,同时,大于10 MHz的干扰也得到进一步的改善。此外还能通过提高滤波器的制造和装配工艺,控制滤波器件的高频分布参数,就可以提高滤波器的高频特性并实

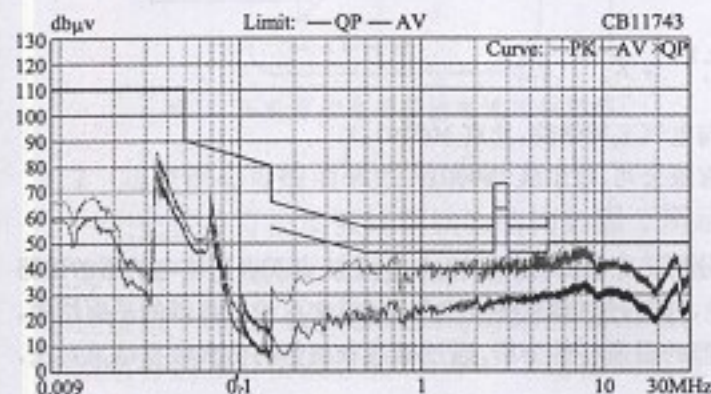


图5 地线添加小磁珠电源传导干扰测试图

现对需要抑制频率的最大衰减。从而使开关电源完全符合国标 GB17743 标准。

4 总结

带高 PF 反激式开关电源器件承受的电压电流应力较大,产生的电磁干扰较大。电路 PCB 设计应严格依照 EMC 的设计原则;在电压电流活跃的节点添加旁路电容或吸收回路,降低变压器的漏感干扰,添加屏蔽层且接到强电的地;能够改善开关电源的 EMC。完全实现开关电源 EMC,必须设计出效果良好的 EMI 滤波器。EMI 滤波器应根据电源的特殊性采用合适的共模电感、正确利用小磁珠、提高装配工艺水平以实现宽频率范围良好的衰减特性。

参考文献:

- [1] Claudio Adragna. Design Equations of High Power Factor Fly-back Converters Based on the L6561, 2003. URL: <http://www.st.com/stonline/products/literature/an/5956.htm>.
- [2] 蔡辰辰, 陆元成, 邱荣斌. 反激式开关电源的变压器电磁兼容性设计[J]. 华东理工大学学报(自然科学版) 2007, 33(4): 589-592.
- [3] 刘凤君. 现代高频开关电源技术及应用[M]. 北京: 电子工业出版社 2008, 1: 600-620.
- [4] 王丽, 陈杨, 张小青. 开关电源 EMI 滤波器的设计[J]. 电气时代, 2006 9: 131-133.
- [5] (法)米切尔·麦迪圭安著. 刘萍等译. 电磁干扰排查及故障解决的电磁兼容技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002, 5: 109-131.
- [6] 白同云, 吕晓德. 电磁兼容设计[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001, 10: 112-130.