

The Structural and Cable EMC Design Research of the Power Supply Systems

Shasha Shen^{1*}, Lei Qiao²

¹Department of Physics and Electronic Engineering, Shanxi Yuncheng University, Yuncheng Shanxi

²Vertiv Technology (Xi'an) Co. Ltd., Xi'an Shaanxi

Email: *ss728@163.com

Received: Nov. 19th, 2018; accepted: Dec. 4th, 2018; published: Dec. 11th, 2018

Abstract

In the power product design, EMC design in the early functional design is the most cost-effective to meet the EMC test. This paper discusses some EMC methods and precautions of communication power system design from the structural design and the cable aspects, including structural shielding, conductive continuity, the layout and assembly of devices, especially the EMC design of the mutual interference between cables and cable routing path. It has certain guiding significance to the power supply system.

Keywords

Structural Shielding, Conductive Continuity, Cable Routing Path

电源系统中结构和线缆的EMC设计

申莎莎^{1*}, 乔磊²

¹山西省运城学院, 物理与电子工程系, 山西 运城

²维谛技术(西安)有限公司, 陕西 西安

Email: *ss728@163.com

收稿日期: 2018年11月19日; 录用日期: 2018年12月4日; 发布日期: 2018年12月11日

摘要

在电源产品设计中为了使样机通过EMC测试, 在前期功能设计时进行EMC设计是最省时间和最有经济效益的。从结构设计和线缆两方面, 论述了通讯电源系统EMC设计的一些方法和注意事项, 包括结构的屏

*通讯作者。

蔽、导电连续性、器件的布局和装配,尤其是线缆之间的互相干扰和线缆走线路径的方面的EMC设计,对通讯电源系统有一定指导意义。

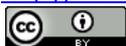
关键词

结构屏蔽, 导电连续性, 走线路径

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

EMC (Electro Magnetic Compatibility), 也就是电磁兼容性, 是指设备或系统在其电磁环境中符合要求运行并不对其环境中的任何设备产生无法忍受的电磁干扰的能力, EMC 包括两个方面的要求: 一方面是指设备在正常运行过程中对所在环境产生的电磁干扰不能超过一定的限值; 另一方面是指设备对所在环境中存在的电磁干扰具有一定程度的抗扰度, 即电磁敏感性。我国的电磁兼容研究起步较晚, 制定了一些与 CISPR 标准、IEC801 等国际标准相对应的国内标准。近年国内强制实施 3C 认证, 替代了原来的 CCIB 和 CCEE 认证, “3C” 是我国强制性产品认证标志——China Compulsory Certification 的英文缩写, 只有取得 3C 认证的产品才能进入国内市场。

电源系统的 EMC 研究工作, 不应该花在发现问题后的整改上, 而要花在前期设计和仿真上, 在前期功能设计时进行 EMC 设计是最省时间和最有经济效益的。相反, 产品研发阶段不考虑 EMC, 在测试时再发现问题就需要大量时间和成本来解决。电源系统的 EMC 设计包括结构设计、线缆设计、滤波器设计和 PCB 设计四个方面, 本文重点论述结构设计和线缆设计[1]。

2. 结构设计

结构的 EMC 设计主要有两个方面: 一个是屏蔽技术, 一个是装配技术。屏蔽技术用来抑制电磁噪声的空间传播, 即切断辐射电磁噪声的传播途径。通常用金属材料或磁性材料把所需屏蔽的区域包围起来, 使屏蔽体内外的“场”相互隔离。如果目的是防止噪声源向外辐射场, 则应该屏蔽噪声源, 这种方法称为主动屏蔽[2]。如果目的是防止设备受外部噪声辐射场的干扰, 则应该屏蔽设备中的敏感电路, 这种方法称为被动屏蔽。装配技术包括机构件的组装、各功能模块的位置和安装, 装配技术常常能决定设备是否能同工作环境实现 EMC。

2.1. 屏蔽技术

2.1.1. 基本原则

电场波的反射损耗大, 磁场波的反射损耗小。屏蔽材料的导电性(电导率)越高, 反射损耗越大。屏蔽材料的厚度、磁导率越高, 吸收损耗越大。对电场的屏蔽主要利用高电导率的薄金属板的反射损耗提高屏蔽效能。对磁场的屏蔽主要利用高磁导率的厚板材料的吸收损耗提高屏蔽效能。电场波和平面波的反射损耗随频率升高而降低; 磁场波的反射损耗随频率升高而增加。低频时, 由于趋肤深度很大, 吸收损耗很小, 屏蔽效能主要取决于反射损耗。高频时, 反射损耗下降, 趋肤深度减小, 吸收损耗增加, 屏蔽效能主要取决于吸收损耗[3]。

2.1.2. 箱体常用的金属屏蔽材料

常用的箱体材料是覆铝锌板材, 厚度一般是 1.5~2 毫米。这种厚度的金属板材对电场、高频磁场的屏蔽效能都很好。而对一些高频的变压器和电感上, 还要做专门的屏蔽罩并做接地, 以防止高频干扰通过空间传递影响到其他器件, 屏蔽罩的厚度越大越好, 通常采用的是 2 mm 厚的覆铝锌板材, 当然用户的非标产品也会制定材料, 表 1 给出了常用金属材料的电导率和磁导率。

Table 1. Conductivity and magnetic permeability of commonly used metal materials

表 1. 常用金属材料的电导率和磁导率

材料种类	σ	μ	$\sqrt{\sigma\mu}$	$\sqrt{\sigma/\mu}$
铝	0.61	1	0.78	0.78
铜	0.35	1	0.59	0.59
热轧硅钢	0.04	1500	7.59	0.0051
冷轧钢	0.17	180	5.53	0.03
不锈钢	0.02	200	2	0.01

2.1.3. 屏蔽的接地

电磁屏蔽的效果取决于屏蔽体的反射损耗和吸收损耗, 而金属屏蔽体通常需要接地, 这是因为系统地往往通过金属屏蔽体和电源地相连或者因为静电防护、安规等要求屏蔽金属体接地。电磁屏蔽的关键是: 保证屏蔽体的导电连续性, 即整个金属屏蔽体必须是一个完整、连续的导体, 实际设计中这一点是不可能做到的, 只能尽量去减少孔缝泄漏。

2.1.4. 注意事项

影响屏蔽效果的有几个主要因素: 缝隙的尺寸、缝隙的数量、箱体的材料, 如果有屏蔽材料的话, 还有屏蔽材料的导电性能和屏蔽性能。紧固点的连接方式直接影响缝隙的深度和尺寸, 而缝隙深度对屏蔽效能的影响最大。一般要求尽可能增大缝隙的深度、减小缝隙的最大尺寸(也就是增加紧固点的数量)。连接面拥有良好的导电性能是缝隙屏蔽的基本前提, 连接面材料的刚性、表面平整度对缝隙屏蔽性有间接影响, 材料的刚性越好, 表面平整度越高, 在同样紧固点数量的前提下缝隙的最大尺寸会小得多[4]。屏蔽材料本身的特性对缝隙屏蔽影响很大, 建议选用导电率较高的导电布、簧片材料。通风孔需要屏蔽覆盖金属丝网、使用穿孔金属板、使用截至波导通风板。

2.2. 布局和装配技术

电源系统中既包含强电又包含弱电, 有的部分电流大电压高, 例如 PFC 和 INV, 有的部分电压低电流小, 例如一些控制与信号处理设备和传感器。而强电产生的电磁噪声往往影响弱电设备的正常工作。结构的布局要遵从强电和弱电的分离、骚扰源和敏感源的分离原则。长期实践表明, 系统中的各个单元模块在独立使用时性能良好, 工作正常, 但是把各个单元组装成一个设备之后相互干扰严重。这就是因为各个单元电路互相干扰, 强电部分影响到了弱电部分, 所以系统的布局和配置在设计初期就要充分考虑。

对于大功率设备各模块要尽量作到模块化, 如 PFC 模块、逆变模块、驱动模块、辅助电源模块、控制单元模块, 各模块功能独立且能相互隔离[5]。各个模块尽量采取独立的屏蔽措施。如不能单独屏蔽, 要充分利用机箱金属件做局部屏蔽和隔离, 例如将敏感模块放入金属隔离舱内。尽量避免电缆从空中走线, 特别如功率模块之间的走线在其它模块周围穿越, 要遵从 PEC 原则。滤波电感和电容的安装位置要

以回路面积最小为原则, 使连接电感和连接电容的电缆越短越好[6]。功率器件要和敏感电路分开, 充分利用机箱和机箱隔离舱做隔离和屏蔽。保证敏感单元远离强干扰源, 如大功率器件。必要时对敏感器件和电路做局部 PCB 屏蔽处理, 或者利用机箱和机箱隔离舱做隔离和屏蔽。特别不能穿越功率模块走线, 更不能和功率器件连线捆扎在一起。

3. 线缆设计

EMC 的线缆设计非常重要, 主要原因是线缆是高效的电磁辐射天线, 90%的辐射超标问题是由线缆辐射引起; 线缆是高效的电磁接收天线, 空间的电磁干扰会被线缆接收后传到设备内部, 影响设备正常工作; 同一束线缆的导线之间或不同束线缆的导线之间由于分布参数的作用存在相互串扰。

3.1. 线缆分类

电源设备线缆配线无论是设备内还是设备外都要遵循一个基本原则: 避免线与线之间的相互串扰。为此对线缆进行分类, 可以分为以下四类:

1) 功率电缆: 主要起大电流的导通作用, 线材的截面一般在 6 个平方毫米(9 AWG)以上, 通过电流 5A 以上

2) 信号电缆: 主要起小电流的导通作用, 线材的截面一般在 6 个平方毫米以下的 UL1007, UL1015, UL2464 等系列电缆。

3) 扁平电缆: 该类电缆结构为多个绝缘单线平行粘连在一起, 主要用于实现系统中的点对点连接。该类电缆主要与电缆连接器相接, 该电缆芯线线径统一为 28AWG, 间距 1.27 mm 耐温 80°C。

4) 编织线: 该电缆结构为软铜编织带两端加铜管压接而成, 在机器里面主要起应力缓冲, 大电流导通的作用, 目前主要是通过电缆厂外包加工。

以上包括了电源线、控制线和信号线。通常电源线和控制线中噪声最大, 可能对信号线产生干扰, 同时信号线之间也可能产生相互干扰, 所以应该正确的选择这些线所用的线缆类型, 恰当的安排线缆的敷设。

3.2. 线缆设计注意事项

线缆的连接能使系统的性能变坏。不仅因为外来骚扰信号会通过相互作用或耦合进入系统中的连接线缆, 对敏感设备构成严重威胁; 还可能因设计、分类(隔离)、捆扎和走线等不当而产生问题。

1) 分系统间的连接线缆和连接器的设计要协调一致。例如, 不能一端接地, 而另一端不接地。不能一端使用屏蔽线缆, 而另一端却选用普通线缆。

2) 不要让主电源线和信号线通过同一连接器, 如果一定要通过同一个连接器, 要尽量保证电源线和信号线之间的最小间距要求[7]。

3) 尽量不要让输入输出信号线通过同一连接器, 例如同一个连接器上既有输入线又有输出线。

4) 根据线缆的分类, 正确进行连接器屏蔽层端接, 保证 360°环接。线缆接插件的选取应根据线缆传输的频率进行: 当传输频率为 DC-10K 时, 接插件可选取塑料连接器, 若考虑到机箱屏蔽可用金属接插件。当传输频率为 10 K~10 M 时, 接插件推荐选取带金属线夹的金属化塑料连接器。如: 金属化塑料外壳的 DB 型连接器等。当传输频率为 10 M~3000 M 时, 接插件推荐选取金属外壳的连接器, 并能保证线缆屏蔽层与接插件外壳 360°环接。如: 金属外壳的 DB 连接器, N 型连接器、Q 型连接器等。360°环接是指线缆的屏蔽层与金属连接器在连接处呈 360°环型连接, 既保证屏蔽层和连接器形成一个封闭的电连续导体。常见的错误接法是为了简便, 将屏蔽层扭成一个小辫之后再连接到金属连接器(或金属机箱), 俗称“猪尾巴”效应。见图 1:

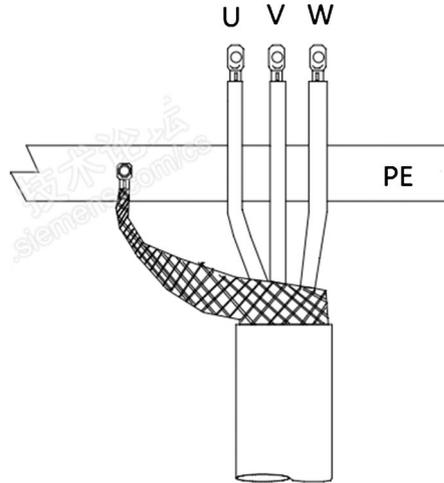


Figure 1. Shield grounding “pig tail” effect
图 1. 屏蔽层接地“猪尾巴”效应

这种接法很大程度的降低了屏蔽层的屏蔽效果。正确的接法是采用屏蔽线缆接头，如同轴线缆连接器，目的都是保证屏蔽层对芯线形成 360° 的完整包围，并且芯线不暴露在外界电磁场中[8]。

3.3. 线缆走线的基本原则

电磁发射线缆与电磁敏感线缆尽量远离，线缆尽量靠近机箱金属体敷设，避免高 dv/dt 或高 di/dt 的来回走线形成大环路。线缆敷设间距要求：为方便给出线缆敷设间距的工程参考值，将上述六类线缆按干扰发射和接收的程度分为以下四级：CLASS1 强敏感线缆线：低电平数字信号线，低电平模拟信号线。CLASS2 弱敏感线缆线：高电平数字信号线，高电平模拟信号线。CLASS3 弱干扰线缆线：控制线，低电压电力线。CLASS4 强干扰线缆线：大功率电力线。

滤波器的输入输出线要分开布置，不能有平行走线，更不能将其捆扎在一起，否则输入线中的噪声将不经滤波器直接耦合到输出线上。机箱中各种非屏蔽走线要尽可能的短。尤其是输入地线和输入滤波器的输入线。对于传递信号的扁平带状线缆，应采用地-信号-地-信号-地排列方式。尤其要减小大 di/dt 、 dv/dt 回路上的线长和回路面积。电源线与敏感信号线缆、模拟信号线缆与数字信号线缆应避免平行敷设[9]。线缆尽量靠近机箱屏蔽体、金属构架敷设，充分利用现存金属结构进行隔离，但要避免靠近机箱屏蔽体上的孔、缝，尽量满足 PEC 原则。滤波器的正确安装如下图 2，滤波器的输入输出分开，而且走线没有交叉。

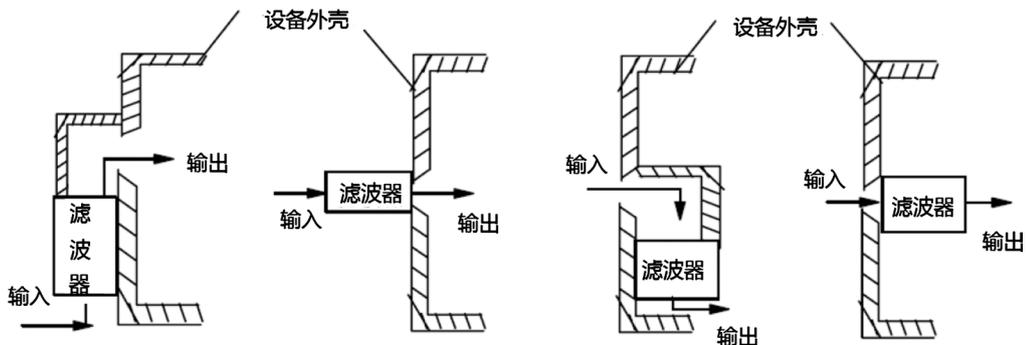


Figure 2. Correct installation of the filter
图 2. 滤波器的正确安装

AC、DC 电源线穿透机柜或机箱时,要求在电源线入口安装电源 EMI 滤波器。滤波器必须固定于机箱屏蔽体上,二者之间的直流接触阻抗要小于 $10\text{ m}\Omega$; 电源进线、出线尽量位于机箱屏蔽体的两侧,并要求电源线从进出机箱处到滤波器接线端的长度要尽量短,一般应小于 6 cm ,最大不超过 8 cm ,见下图 3。

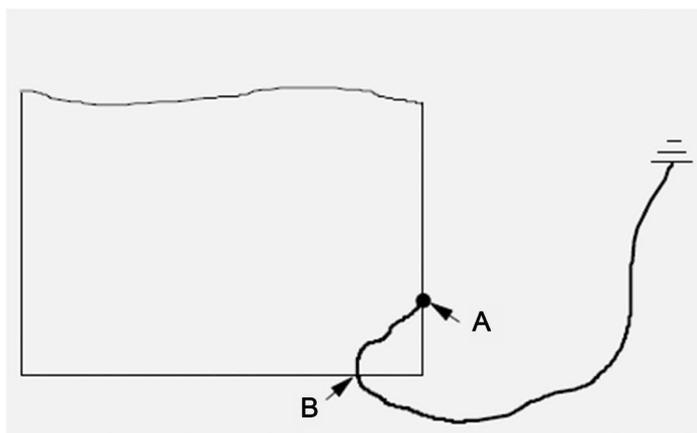


Figure 3. The internal wiring of the cabinet does not exceed 8 cm .
图 3. 机柜内部走线不超过 8 cm

3.4. 线缆走线的 PEC 原则

PEC (Parallel Earthing Conductor) 是依据 IEC61000-5-2:1998[97]和 prEN50172-2[73]标准提出的线缆敷设所要求的平行地导体,如线缆架、线缆槽、背板、隔离挡板、机箱(它们都是可靠接地的)等,线缆要与它们平行紧密敷设。PEC 的主要作用是能为线缆的地电流(位移电流)提供一个较低的转移阻抗通路。由于地电流通常是 $50/60\text{ Hz}$,所以当线缆按照 PEC 模式走线时,线缆和与线缆平行排列的 PEC 之间有足够大的电容形成低的转移阻抗,为线缆的地电流提供通路[10]。

某产品在 RE 测试中,发现该直流线缆的敷设方式对辐射测试结果有较大的影响,原来直流负载线缆没有紧贴机柜走线,与系统机壳存在一定的距离,将直流负载线缆紧贴机壳走线,测试结果就有所改善,建立模型如图 4 来分析:

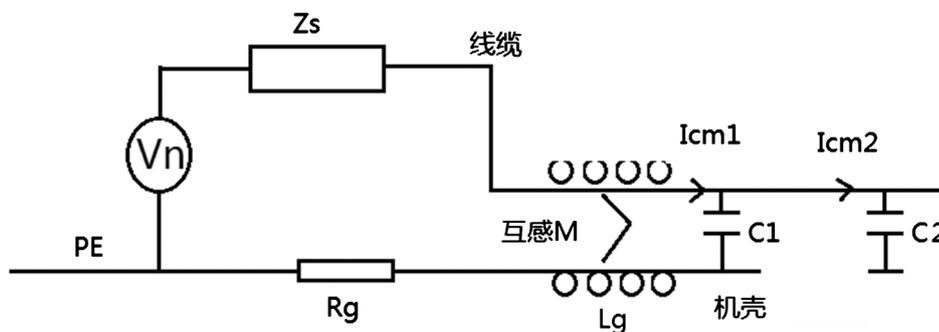


Figure 4. Cable routing model
图 4. 线缆走线模型

图中 V_n 为在线缆上驱动共模电流的等效共模噪声源, Z_s 为等效源阻抗, R_g , L_g 分别为机壳自身的电阻和电感, M 为线缆与机壳之间的互感, C_1 为机柜内线缆与机壳之间的寄生分布电容, C_2 为机柜外

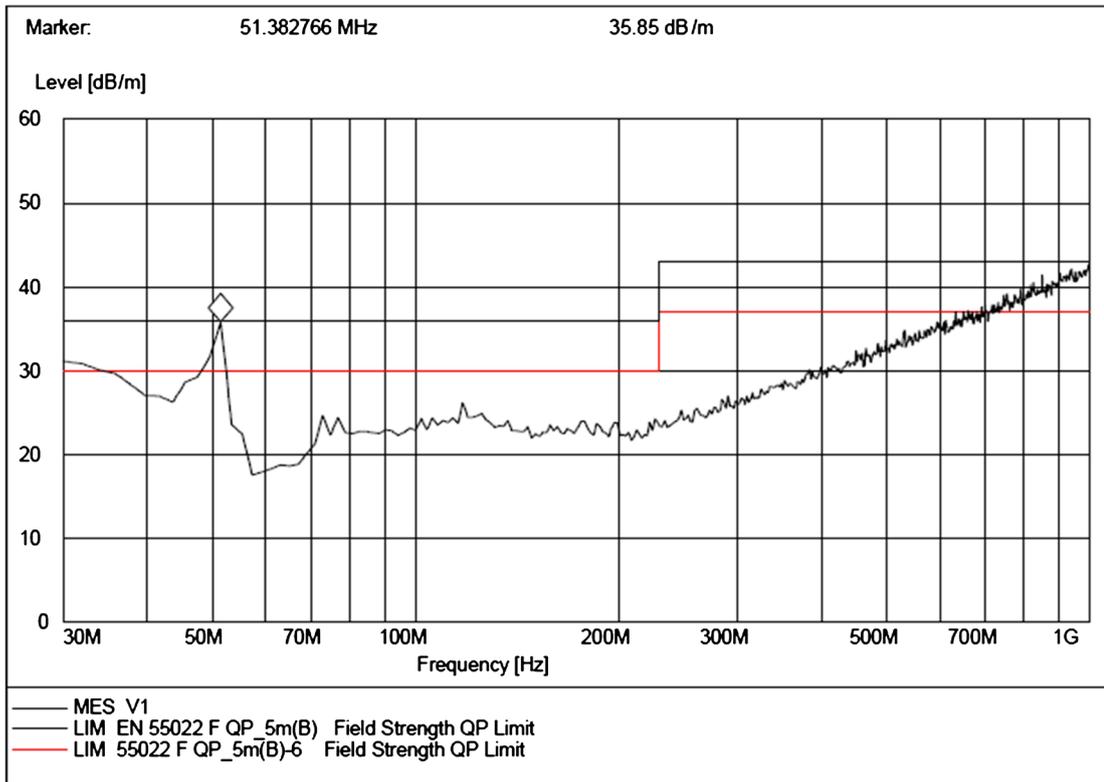


Figure 5. Test results of cables away from the cabinet

图 5. 线缆远离机柜的测试结果

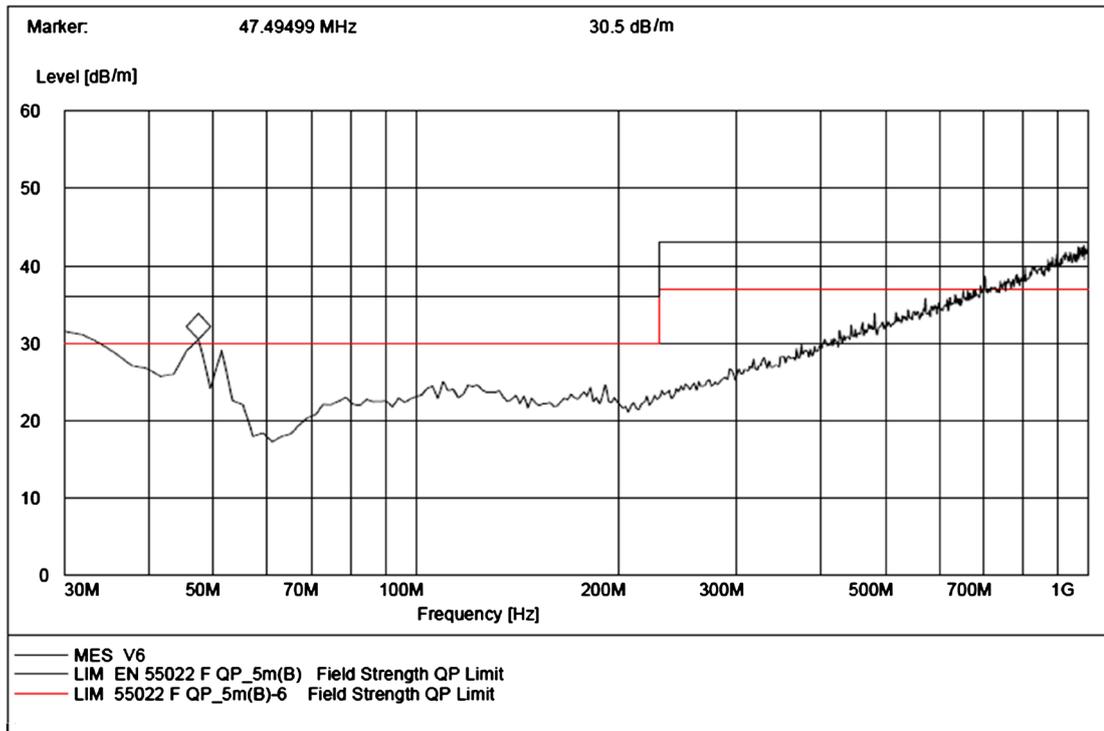


Figure 6. Test results of the cable close to the cabinet

图 6. 线缆紧贴机柜的测试结果

线缆与转台地平面的寄生分布电容, 流经线缆上的共模电流 $I_{cm} = I_{cm1} + I_{cm2}$ 随着线缆与机壳之间距离 d 的减小, 线缆与机壳之间的互感 M 和机柜内线缆与机壳之间的寄生分布电容 $C1$ 相应增大, 共模电流 I_{cm1} 流经的支路阻抗为 $Z = R_g + j\omega(L_g - M) + 1/j\omega C1$ 就减小, I_{cm1} 增大, 即线缆上的共模电流更多地 在机柜内被分流, 导致流经机柜外线缆的共模电流 I_{cm2} 减小, 这样通过暴露在机柜外的线缆辐射就减小 了。

从环路的角度看, 随着线缆与机壳之间距离 d 的减小, 线缆上共模电流 I_{cm} 与地之间包围的环路面 积减小, 使其产生的对外发射减小。因此在系统中线缆敷设应尽量使整个线缆与接地平面导体平行敷设, 距离要尽量小。图 5 为线缆远离机柜的测试结果, 图 6 为线缆紧贴机柜的测试结果, 可见 51.5 M 处读值 由 36 降为 29, 改善效果明显。

4. 总结

EMC 涉及的理论基础包括数学、电磁场理论、天线与电波传播、电路理论、信号分析、通信原理、 材料科学等等。几乎所有现代工业都涉及 EMC 问题, 所有的产品都应该在前期设计中注意 EMC 设计, 否则后续会花费几倍的时间和精力去解决, 往往得不偿失。本文论述了通讯电源系统 EMC 设计的一些方 法和注意事项, 包括结构的屏蔽、导电连续性、器件的布局和装配, 尤其是线缆之间的互相干扰, 线缆 走线路径的 EMC 设计分析, 对通讯电源系统的 EMC 设计有一定指导意义。

参考文献

- [1] 全国电磁兼容标准化联合工作组. 电磁兼容标准实施指南[S]. 中国标准出版社, 2010.
- [2] 陈穷. 电磁兼容性工程设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 203-206.
- [3] IEC61000 [S]. 国际电工委员会, 1998.
- [4] 王大平, 张杭, 赵新明. 电子兼容设计中的滤波方法[J]. 电气时代, 2008(2): 80-83.
- [5] Laszlo, T. (1995) Electromagnetic Compatibility in Power Electronics. IEEE Press.
- [6] Williams, T. and Armstrong, K. (2000) EMC for System and Installation. Newnes.
- [7] Hartal, O. (2004) Electromagnetic Compatibility By Design. Springer, US.
- [8] 杨春宇, 严赫. 电子电气产品结构架设计对 EMC 性能的影响[J]. 电气自动化, 2016(1).
- [9] 祁迎春, 路桂娟. 基于电磁感应的物理电源的设计[J]. 电源技术, 2016(8).
- [10] 邱成悌. 电子设备结构原理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2001.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2327-0853, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ojcs@hanspub.org