

文章编号: 2095-4980(2019)04-0653-04

基于复杂系统的电磁兼容设计方法可行性分析

卫 宁

(中国船舶工业系统工程研究院 三所, 北京 100094)

摘 要: 目前, 电磁兼容(EMC)设计已成为复杂系统设计的一个重要组成部分, 电磁兼容设计方法主要有测试分析法、经验分析法和建模仿真法三种。从日益复杂的电磁环境的要求出发, 结合高度集成的复杂系统电磁兼容设计的实际困难以及电磁兼容设计人员的具体情况, 分析测试分析法、经验分析法和建模仿真法这三种电磁兼容设计方法的可行性, 指出三种方法的适用范围和面临的问题, 从实用角度提出建立电磁兼容数据库, 将电磁兼容测试数据、电磁兼容设计经验和电磁兼容模型全部入库的建议, 对提高复杂系统的电磁兼容性具有现实意义。

关键词: 系统; 电磁兼容; 方法; 可行性

中图分类号: TN813

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201904.0653

Feasibility analysis of EMC design method based on complex system

WEI Ning

(The 3rd Institute, Systems Engineering Research Institute, Beijing 100094, China)

Abstract: At present, Electro Magnetic Compatibility(EMC) design has become an important part of the design of complex systems. There are three main methods of EMC design: test analysis method, empirical analysis method and modeling simulation method. Aiming for the increasingly complex electromagnetic environment requirements, combined with practical difficulties in EMC design of complex systems with high integration and the specific circumstances of EMC designers, the feasibility of the three EMC design methods is analyzed, and the scope and problems of the three methods are pointed out. From a practical point of view, a proposal to establish an EMC database for EMC test data, EMC design experience and electromagnetic compatibility model is proposed. It is of practical significance to improve the electromagnetic compatibility of complex systems.

Keywords: system; Electro Magnetic Compatibility(EMC); method; feasibility

随着科学技术的发展, 在信息化战场上围绕电磁波的控制和利用而形成的制电磁权, 已经成为作战双方激烈争夺的战争“制高点”之一。电磁波不仅是信息获取的重要媒介和最佳载体, 也是隐形电磁空间的制造者, 它就像一把双刃剑, 在推动武器装备现代化的同时, 也使战场电磁环境日趋复杂, 电磁斗争日益激烈。复杂的电磁环境要求系统必须具有良好的电磁兼容性, 目前基于复杂系统的电磁兼容设计方法主要有测试分析法、经验分析法和建模仿真法三种, 分析这三种方法的可行性, 对实际设计工作具有重要指导意义。

1 测试分析法

测试分析法是把电磁兼容设计作为复杂系统设计的最后一个阶段来考虑, 而且仅仅在最后一个阶段考虑。系统设计人员不对电磁场的理论和电磁兼容的机理进行研究, 在系统设计初期只基于功能考虑不进行电磁兼容设计, 这样完成的系统在设计和调试后, 直接进行电磁兼容测试, 通过频谱分析仪和近场探头等电磁干扰检测器, 检查干扰源的泄露位置, 对着频谱分布图(见图 1)分析超标频点的分布和超标幅度, 从而确定超标频点是从系统什么地方出来, 以及是怎样出来的, 例如通过辐射或是传导的方式, 然后有针对性地采取屏蔽、接地、滤波等补救措施, 反复多次测试后最终达到电磁兼容标准的要求^[1]。

收稿日期: 2017-12-01; 修回日期: 2018-02-27

基金项目: 总装预研基金资助项目(9140 A 33060116 J W 08001)

实践表明,通过电磁干扰测试可以实现对电磁干扰源的实时定位,从而有利于对干扰源的快速排查。这种方法不需了解电磁干扰的形成机理及其抑制措施,只需要对电磁干扰信号的时域、频域、能量、信号形式等特性进行测试分析。根据电磁干扰的传播途径,通常可以利用传导发射测试或辐射发射测试的方式提取电磁干扰的特征参数^[2]。但是,频谱分析仪是一种窄带扫频接收机,它在某一时刻只能接收某一频率范围内的能量^[3],而瞬态干扰是一种脉冲干扰,具有频谱范围宽、持续时间短的特点,因此频谱分析仪在瞬态干扰发生时接收到的只是其总能量的一小部分,不能反映出其真实的干扰情况,检测结果并不准确^[4]。依据现行的电磁兼容测试标准,对电磁干扰的传导发射测试主要采用线阻抗稳定网络方式,其测试得到的是共模和差模干扰信号的混合,无法直接检测共模和差模干扰信号的具体分量^[5]。另外,电磁干扰的辐射发射测试一般是在电波暗室等试验室进行,测试得到的往往是多个辐射电磁干扰在测试点处的矢量叠加,即辐射总干扰^[6]。这样一来,在对大型复杂系统进行辐射电磁干扰测试时,多个子系统辐射产生的电磁干扰就会混叠在一起,无法准确获得某子系统单独辐射产生的电磁干扰频谱特征^[7]。

虽然为准确反映电磁干扰源特征及其辐射情况,具有高测量精确度和可靠性的近场扫描技术已经被广泛应用,例如通过近场波阻抗测试实现对辐射电磁干扰源个数和特性的分析;传导电磁干扰的分离精确度也在不断提高,例如利用反向传播神经网络实现对电磁干扰源的分类识别;甚至实现了在工作状态下利用双电流探头对共模和差模噪声源阻抗进行精确提取分析;即可以通过对周围电磁干扰的自适应滤除实现对任一分系统的电磁干扰测试,但这种方法解决不了复杂系统对外部环境干扰的电磁防护问题。电磁兼容是指设备、分系统、系统在共同的电磁环境中能同时执行各自功能的共存状态,主要包括两个方面的内容:一是设备、分系统、系统在预定的电磁环境中运行时,能够按设计的工作性能,且不因电磁干扰而受损或产生不可接受的降级;二是设备、分系统、系统在预定电磁环境中正常工作时不会给环境中其他设备带来不可接受的电磁干扰^[8]。由此可见,测试分析法进行得再充分,运用的方法再先进,也只能解决第二方面的问题,不能解决第一方面的问题,在复杂系统的电磁兼容设计中可行性很有限。

2 经验分析法

经验分析法是在复杂系统技术设计的同时考虑电磁兼容设计,并且每个阶段都考虑。根据电磁兼容专家掌握的电磁原理和长期积累的经验,在系统总体设计阶段,考虑功能模块的合理划分和电缆的合理布局,由于电缆能够把 PCB 板上的信号发射出去,因此电缆的长度、走线路径、屏蔽方式、固定方法、电缆间距等都需要考虑电磁兼容性^[9];在系统各分系统设计阶段,考虑接地系统和接地点的设计,由于合理的接地是最经济有效的电磁兼容设计技术,因此至少会考虑一个低电平信号地线,一个继电器、电动机和高电平信号等干扰地线,一个机壳、底座的安全地线^[10]。在系统设备研制阶段,考虑机箱的屏蔽设计、PCB 的布线设计、电子元器件的选择和布局以及电路的滤波设计等,由于机箱的屏蔽设计对于设备的电磁兼容性非常重要,因此机箱上缝隙、显示器安装孔、电缆通孔、减振器安装孔和散热孔等各种孔缝的设计都需要考虑电磁兼容性。上述这些电磁兼容设计都需要设计人员了解电磁兼容问题产生及抑制的机理,很多时候是依靠多年设计摸索的规律和积累的经验,尤其是对于电磁敏感电路的识别,电磁兼容性设计师的经验至关重要。例如对于低电平电路、信号检测电路、传感器输入电路和前级放大电路的接地设计,有经验的电磁兼容性设计师会非常注意^[11];还有一种电磁隔离设计就是浮地,虽然浮地与大地无导体连接,使电路不受大地电性能的影响,但是会使电路容易受到寄生电容的影响,从而导致电路的地电位发生变化,加大对模拟电路的感应干扰,因此有经验的电磁兼容性设计师会非常谨慎地使用浮地。

实践表明,优秀的系统总体设计、结构设计和电路设计是保证系统良好的电磁兼容性的基础,但这对系统设计人员的要求很高。系统设计人员必须具备丰富的电磁兼容性设计经验,通常是专业的电磁兼容设计师,了解电磁兼容问题产生及抑制的机理,能够根据不同的干扰类型选择合适的滤波器,并能根据不同的电路类型选择适宜的滤波器安装位置;能够根据电缆的长度和电路的频率设置接地点,并能根据电路的频率选择合适的隔离元器件阻止电路性耦合。电磁兼容性设计渗透在复杂系统设计的方方面面,而各分系统有时不一定是同一个

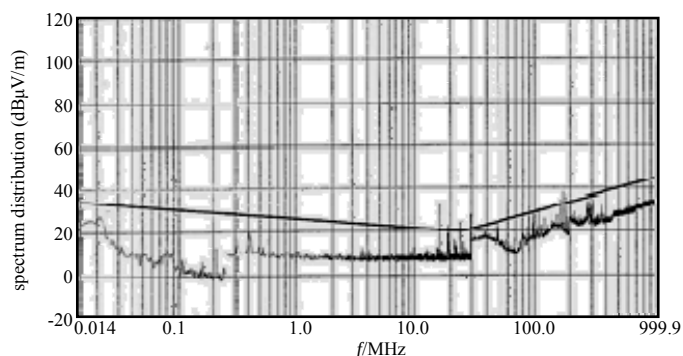


Fig.1 Spectrum distribution map with over standard frequency points

图 1 有超标频点的频谱分布图

技术责任单位，因此电磁兼容设计人员不但要全面考虑，通常还要经过协调、评审和调整才能使设计符合要求，如果项目组没有配备这样的专业人员，系统是难以实现的。电磁兼容性设计还涉及到材料选择和元器件选择，例如屏蔽体材料和接地搭接条材料，用于滤波的穿心电容器、支路电容器、片状电阻器等。由于新材料和新型元器件日新月异，层出不穷，导致设计经验积累速度跟不上，这些都会影响到经验分析法的可行性。

3 建模仿真法

建模仿真法是电磁兼容设计的重要方法，能在复杂系统设计初期对电磁兼容性进行模拟和预测。针对电磁干扰源的建模仿真，需要开发从器件级到 PCB 板级，再到设备级、系统级的全套模型，不同的电磁兼容仿真对象采用不同的建模方法(如表 1 所示)。除人为电磁干扰源之外，对来自自然环境的电磁干扰源也要进行建模仿真。针对集成电路电磁敏感度的建模仿真已经有一个标准化的集成电路抗扰度建模方法，用于描述电磁干扰和集成电路敏感端口之间的耦合关系和集成电路本身的电磁敏感性表现行为。针对设备或系统的电磁敏感度，可以通过综合应用电磁拓扑理论、解析分析方法和数值计算方法进行系统级传导和辐射抗扰度分析、求解和建模。针对电磁能量耦合途径建模，可以利用场路协同仿真建模方法对复杂系统的电磁能量耦合规律进行分析。

表 1 不同的电磁兼容仿真对象采用的建模方法
Table1 Modeling methods used for different EMC simulation objects

serial number	EMC simulation object	modeling method
1	high frequency electromagnetic field in planar circuit	moment method
2	highly nonlinear transient electromagnetic field	finite element method
3	optimization simulation of electromagnetic compatibility parameters emulation of electromagnetic sensitivity	finite difference method
4	low frequency electric field low frequency magnetic field high frequency electromagnetic field	finite integral method

随着电磁环境越来越复杂，电磁干扰覆盖的频率范围越来越宽，建立准确、宽带的系统级电磁敏感度模型越来越难。随着电子器件频率的急剧增加，电磁兼容仿真建模对模型的高频性能也提出了更高要求^[12]。目前，电子器件的分布参数模型比之前的集总参数模型适用频率范围更宽，建模精确度更高；针对一个周期内多开关状态的功率变换器，建立了基于模块的等效噪声源模型，并通过分区域的方法预测电磁干扰，有效解决了基于开关动作的等效解析模型不能实现整个传导干扰频段内的噪声预测的问题^[13]；针对 ESD 产生的电磁场进行数学建模时利用时域有限差分法对 ESD 电磁脉冲进行数值建模，有效解决了此前辐射场偶极子模型充分考虑了放电过程中电荷所产生的场分量，但是没有考虑电流产生的场，不能够正确计算远区场的问题^[14]；针对 PCB 板的电磁场，结合近场扫描技术，通过多软件联合建模，建立了一个涵盖整个交流输出周期内不同负载电流水平的噪声源模型的集合^[15]。综上所述，在电磁兼容的建模方面，现有的建模方法虽然也可以完成准确的仿真预测，但往往是通过大幅度增加模型复杂度来实现的，这无疑会加大系统级建模仿真的实施难度，降低在工程中建模仿真法实施的可行性。对于一个复杂系统而言，要想测试其电磁干扰发射水平，依据现有的电磁兼容标准就可以实现；但要在设计初期，对一个复杂系统的电磁发射水平进行系统级的建模预测，往往需要获得该系统各分系统的电磁干扰发射模型，而由于各分系统的技术责任单位往往不同，相关的模型或数据还需要由相应的设备技术责任单位来提供，因此，如何获取并整合复杂系统各组成部分的电磁干扰发射模型将是建立系统级电磁干扰发射模型需要面临和解决的一个问题，也是决定建模仿真法是否可行的关键问题。更何况对于任意一个复杂系统而言，它往往既是电磁干扰源，同时也是敏感对象，因此寻求简洁高效的电磁敏感度宽带建模方法可行性很低。将电磁效应、热力学效应等多种电磁环境效应进行综合考虑，建模仿真法的可行性就更低。

4 结论

日益复杂的电磁环境、高度集成的复杂系统对电磁兼容设计提出了更高要求。目前电磁兼容设计采用的三种主要设计方法都有一定的局限性：测试分析法不能解决电磁防护问题，经验分析法跟不上新材料和电子元器件更新的速度，建模仿真法面临如何获取并整合复杂系统各组成部分电磁敏感度模型的挑战。因此，根据现有电磁兼容设计人员的专业特长和技术特点，选择适合的设计方法，并建立电磁兼容数据库，将电磁兼容测试数据、电磁兼容设计经验和电磁兼容模型全部入库，具体包括根据经验选择相应数据的分析方法，根据模型的仿真结果修改算法和开发新的算法，并将调整后的模型和测试数据入库，这样不断迭代使模型趋于完善，才是更可行的电磁兼容设计方法。

参考文献:

- [1] 王泰春,贺云汉,王玉芝. 电磁脉冲导论[M]. 北京:国防工业出版社, 2011. (WANG Taichun, HE Yunhan, WANG Yuzhi. Introduction to electromagnetic pulse[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.)
- [2] YANG B, ZHOU B H. Probability and confidence of electrical devices under certain radiation environments[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012, 10(21): 754–758.
- [3] 赵墨, 马良, 吴伟, 等. 差分型脉冲电场测量系统的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(10): 1148–1152. (ZHAO Mo, MA Liang, WU Wei, et al. The development of pulsed E-field sensor based on differential measurement[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, 32(10): 1148–1152.)
- [4] 马良, 吴伟, 程引会, 等. 基于原始波形测量的脉冲电场探测器[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(11): 2763–2768. (MA Liang, WU Wei, CHENG Yinhui, et al. Pulsed electric field sensor based on original waveform measurement[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(11): 2763–2768.)
- [5] 黄建领, 姚利军. 瞬变电磁场场均匀性校准[C]// 2013 年全国微波毫米波会议. 北京: 电子工业出版社, 2013: 1500–1503. (HUANG Jianling, YAO Lijun. Field uniformity calibration of transient electromagnetic field[C]// Proceedings of the 2013 National Conference on Microwave and Millimeter Wave. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 1500–1503.)
- [6] 王赞, 陈永光, 王庆国, 等. 辐射式核电磁脉冲模拟器 TEM 喇叭天线[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 242–247. (WANG Yun, CHEN Yongguang, WANG Qingguo, et al. Analysis of TEM horn antenna for radiating-wave nuclear electromagnetic pulse simulator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(1): 242–247.)
- [7] 王赞, 范丽思, 成伟, 等. 辐射式核电磁脉冲模拟器快沿脉冲源研制[J]. 军械工程学院学报, 2015, 27(5): 32–36. (WANG Yun, FAN Lisi, CHENG Wei, et al. Development of fast-rising pulse source for radiating wave nuclear electromagnetic pulse simulator[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2015, 27(5): 32–36.)
- [8] International Electrotechnical Commission(IEC). Electromagnetic compatibility(EMC) part 4–21: testing and measurement techniques–reverberation chamber test methods: IEC 61000–4–21[S]. Switzerland: IEC, 2011.
- [9] 邵涛, 胡以华, 石亮, 等. 战场电磁环境复杂度定量评估方法研讨[J]. 电光与控制, 2010, 17(1): 81–83. (SHAO Tao, HU Yihua, SHI Liang, et al. Methods for quantitative evaluation of battlefield electromagnetic environment complexity[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(1): 81–83.)
- [10] 李杰然, 张瑞峰. 基于模糊算法的战场电磁环境复杂性定量评估[J]. 舰船电子对抗, 2011, 34(1): 106–108. (LI Jieran, ZHANG Ruifeng. Quantificational evaluation on the complexity of battlefield electromagnetic environment based on fuzzy algorithm[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2011, 34(1): 106–108.)
- [11] 董俊, 蒲秀英, 韩慧, 等. 电磁环境分形特性分析与量化[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(3): 428–432. (DONG Jun, PU Xiuying, HAN Hui, et al. Fractal characteristics and quantification method of electromagnetic environment[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(3): 428–432.)
- [12] 郭春营, 李虹轶, 许伟, 等. 电磁加固设计余量可靠度与置信度评估算法分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(6): 920–924. (GUO Chunying, LI Hongyi, XU Wei, et al. An evaluation algorithm for the reliability and confidence of EMP hardening design margin[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(6): 920–924.)
- [13] 陈子鹏, 戴亚文, 李鹏, 等. 无线传感器电磁脉冲效应实验及防护电路设计[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(5): 146–150. (CHEN Zipeng, DAI Yawen, LI Peng, et al. Effect of ESD EMP test on wireless sensor and protection network design[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(5): 146–150.)
- [14] 吴启蒙, 魏明, 张希军, 等. 瞬态抑制二极管电磁脉冲响应建模[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3): 799–803. (WU Qimeng, WEI Ming, ZHANG Xijun, et al. Electromagnetic pulse response modeling of transient voltage suppressor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(3): 799–803.)
- [15] 张兰勇, 刘繁明, 李冰. 印制电路板电磁辐射等效偶极子建模与预测[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 942–945. (ZHANG Lanyong, LIU Fanming, LI Bing. Equivalent dipole modeling and predicting of electromagnetic emissions of printed circuit boards[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(4): 942–945.)

作者简介:



卫 宁(1977–), 女, 河北省邢台市人, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为船舶行业复杂系统设计. email: zhou_aaa@sina.com.