文章编号: 2095-4980(2019)06-1045-06

设备级线缆强电磁辐照敏感度仿真分析

刘恩博1,李智深2,陈旗1,张钰*1

(1.广州广电计量检测股份有限公司 电磁兼容研究所,广东 广州 510656;2.装备发展部军事代表局 驻镇江地区军事代表室,江苏 镇江 212000)

摘 要:针对近年来复杂电磁环境中强电磁脉冲攻击,研究得出设备级强电磁辐照敏感度仿 真分析方法。该方法采用3D电磁场仿真及2D电路仿真相结合的手段,通过建立几何模型、定义材 料参数、添加负载及激励源、放置监测探头等步骤,最终仿真得出设备外壳内部及线缆上耦合电 流的时域、频域特性。由仿真结果可知,设备内部及线缆上耦合的电压、电流在极短时间内即可 达到具有破坏性的峰值,且其同时具备较宽的频谱,从而可对多种电子设备造成毁伤。因此,当 电子设备处在复杂电磁环境强电磁脉冲攻击下,必须采取一定的强电磁保护措施。本仿真方法也 可适用其他通用电子设备强电磁辐照敏感度仿真分析。

关键词:复杂电磁环境;强电磁脉冲;电磁场仿真;辐照敏感度;线缆 中图分类号:TN806 文献标志码:A doi: 10.11805/TKYDA201906.1045

Simulation analysis of cable harsh electromagnetic irradiation susceptibility about electronics

LIU Enbo¹, LI Zhishen², CHEN Qi¹, ZHANG Yu^{*1}

(1.EMC Institute, GRG Metrology and Test, Guangzhou Guangdong 510656, China; 2.Zhenjiang Military Representative Room, Military Representative Bureau of Equipment Development Department, Zhenjiang Jiangsu 212000, China)

Abstract: A simulation analysis method of harsh electromagnetic irradiation susceptibility about electronics is proposed aiming for high electromagnetic pulse attack in complex electromagnetic environment. This method combines 3D electromagnetic field simulation with 2D electric circuit simulation, which includes steps of building model, defining material parameters, adding load and exciting source, placing observation points. This method can obtain time-domain and frequency-domain characteristic of space and cable. According to the simulation results, the voltage and current in space and cable can reach peak soon with broad frequency domain, which are able to destroy many electronics. Therefore, some methods should be adopted to protect electronic devices. The proposed simulation method also can be utilized to analyze harsh electromagnetic irradiation susceptibility of all common electronics.

Keywords: complex electromagnetic environment; high electromagnetic impulse; electromagnetic simulation; irradiation susceptibility; cable

信息化作战条件下,战场电磁环境是影响作战效能生成的关键要素,已成为作战指挥必须考虑和关注的重要 方面^[1]。复杂电磁环境主要是指:在一定的作战时空内,人为电磁发射和多种电磁现象的总合^[2]。构成复杂电磁 环境的主要因素有敌、我双方的电子对抗,各种武器装备所释放的高密度、高强度、多频谱的电磁波,民用电磁 设备的辐射和自然界产生的电磁波等^[3]。在复杂电磁环境众多分类中,强电磁脉冲对电子设备的影响近年来受到 越来越多的关注^[4]。在军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量(GJB151B-2003)中,RS105 明确规定了强 电磁脉冲的波形,当设备具有相关强电磁抗击要求时,需要通过上述试验测试。但 GJB151B-RS105 中规定的强 电磁脉冲波形由于上升沿极窄,幅值场强极大,实验室中较难制备该波形的激励源,因此认证试验的费用较高^[5]。 对于 RS105 测试、整改循环操作需消耗大量时间和财力的不利因素,可通过仿真方法进行性能摸底及整改效 果评估^[6]。仿真软件介入到设备前期设计,可帮助提高产品的电磁兼容(Electro Magnetic Compatibility, EMC)性能,从而顺利通过标准实验测试。因此,利用仿真软件研究电子设备电磁特性在近年来逐步受到重视。

国内外已有众多学者利用仿真软件研究电子设备的电磁特性。包括利用电磁仿真软件研究孔阵对腔体屏蔽效能的影响^[7];利用仿真方法研究非中心开孔机箱的电磁屏蔽特性^[8];利用仿真方法研究 PCB 嵌入机壳内部时,设备级电磁辐射的仿真问题^[9];以及利用仿真方法研究缝隙的电磁泄漏问题^[10]。仿真方法同样可以用在民品,如计算机电磁兼容特性研究中^[11]。某研究院建立了 RS105 试验环境的模型,并进行了场级仿真分析^[12]。尽管国内外学者利用仿真软件研究了众多电磁问题,但却止步于电磁场级仿真,并没有将电磁场级仿真与电路级仿真相结合。

本文旨在研究强电磁脉冲辐照下,获取空间及线缆上耦合电压、电流的仿真方法。通过将 3D 电磁场仿真及 2D 电路仿真相结合,将空间的电磁场能量耦合至线缆上电流能量,从而获取线缆在强电磁脉冲辐照下的耦合电 流。由仿真结果可知在强电磁脉冲辐照下,设备内部空间及线缆耦合电压、电流的时域、频域特性,以及不同类 型、不同结构线缆的差异,从而可对设备强电磁脉冲防护提供一定的技术指标。本仿真方法也适用于其他通用电 子设备强电磁辐照敏感度仿真分析。

1 仿真机理

设备级强电磁辐照敏感度仿真分析需要涉及 3D 电磁场全波仿真及 2D 电路仿真。其中, 3D 电磁场全波仿真采取的数值方法是传输线矩阵 (Transmission-Line Matrix, TLM)法^[13]; 2D 电路仿真采取的是传输线(TL) 法。在 CST 仿真软件线缆工作室(Cable Studio)中可建立 3D 模型并提取 2D 传输线模型导出等效 SPICE 电路模型。

传输线矩阵法由 Hugens 光传播模型与等效传输线理论相结合产生。 使用传输线矩阵网络中电压和电流脉冲传播规律来模拟电磁场传播,利用 基于矩阵的麦克斯韦方程和传输线方程类比,通过在散射矩阵中计算并联 结点电压和串连结点电流得到电场和磁场大小。

线缆 2D 电路仿真包括以下步骤: a) 网格划分。仿真软件会对线缆中每一个小段的横截面进行网格划分,如图 1 所示。b) 模型抽取。提取划分后的每一个线缆小段中的传输线参量(电阻值 *R*、电感值 *L*、电容值 *C*),每一个小段都会转化成一个传输线等效电路,最后所有小段的等效电路将连成一个完整的电路模型。c) 计算求解。对线缆终端添加适当负载和激励,最终求解得出线缆线束上电磁能量时域与频域的传输特性。

2 仿真模型

建立某设备的外壳结构,其尺寸为 220 mm×80 mm×180 mm,如图 2 所示。其中,机壳采用理想导电体 PEC 材料,显示屏材质为玻璃(相对介电常数 ε=4.82,损耗角正切 0.005 4),按键材质为某塑料(相对介电常数 ε=3,损耗角正切 0.02),散热孔为 8×4 的圆形孔阵。



本文主要研究外部强电磁干扰对机箱内部线缆的直接耦合作用,对于线缆连接器或接口的影响暂不考虑。在 设备外壳的内部分别建立4根线缆:单芯线、双绞线、同轴线、屏蔽双绞线。4种线缆的位置如图3所示,其横 截面如图4所示。





图 4 线缆结构示意图

在定义好机壳及线缆的结构、位置、材料等参数后,进行网格划分及模型抽取操作,可得出线缆外接接口。 在线缆外接接口处添加相关负载,如图 5 所示。其中,单芯线两端接 50 Ω 电阻再接地;双绞线同侧接 100 Ω 电 阻再相连;同轴线同侧接 50 Ω 电阻再相连,其屏蔽层单端接地;屏蔽双绞线的线芯同侧接 100 Ω 电阻再相连, 其屏蔽层双端接地;在 4 根线缆上均添加电流、电压探头。



Fig.5 Diagram of cable load connection 图 5 线缆负载连接示意图

外部激励源采取 IEC 61000-2-9 中的强电磁脉冲波形 (GJB151B 中 RS105),上升沿 2.5 ns,下降沿 55 ns,峰值场强 50 kV,如图 6 所示。强电磁脉冲定义为平面波,从设备的斜上 方进行入射,其电场、磁场、入射方向遵守右手螺旋准则。如 图 7 所示。在设备中心添加一个电场监测点,其坐标位置为 (110,40,90)mm。至此,所有仿真参数均设置完毕。

3 仿真结果

仿真计算完成后,可得出电场监测点即机壳内部中心位置 感应电场的时域、频域特性如图 8 所示。由图 8(a)时域特性曲 线可知,当强电磁脉冲入射后,机壳内部大约仅需 3.5 ns 即可 达到电场峰值 450 V/m。中图 8(b)频域特性曲线可知,在低频路





Fig.7 Diagram of strong electromagnetic pulse incidence 图 7 强电磁脉冲入射示意图

达到电场峰值 450 V/m。由图 8(b)频域特性曲线可知,在低频段,机壳内部电场峰值可高到 13 dBµV/m。

3.1 不同类型线缆仿真结果对比

4 种线缆芯线上的电流频域特性如图 9 所示。可以看出,同轴线的屏蔽层及屏蔽双绞线的屏蔽层均可极大



3.2 不同长度线缆仿真结果对比

为了探究不同线缆长度对线缆辐射敏感度的差异,把原机箱模型内部4根线缆换为一根线缆,固定线缆位置 不变,改变线缆长度后对比结果。如图 10 所示,给出了4种线缆不同长度的仿真结果对比,可以看出随着线缆 长度变短,芯线上的感应电流也明显减小,但是总的趋势没变,说明线缆辐射敏感度与其暴露在外部场强的长度 正相关。







图 10 不同长度线缆上电流仿真结果对比

图 11 给出了 3 种屏蔽结构下频域仿真结果,可以看出,采用固体铜管屏蔽层的线缆芯线上感应电流明显比 其他两种小,而采用编织层的最差,铝箔纵包则没有缝隙问题,因此芯线感应电流相比编织层也少很多,但是由 于铝箔厚度及介电常数不及固体铜管,因此芯线感应电流相比铜管屏蔽方案差一个数量级。



图 11 不同屏蔽结构同轴线频域响应

随后研究相同编织类型不同材料的差异,以屏蔽双绞线为例,分别用纵包铝箔和纵包铜箔进行屏蔽,铜的电导率高于铝,其吸收损耗与反射损耗都高于铝,因此推测其屏蔽效能更好。仿真结果如图 12 所示,可以看出,铜箔的屏蔽效果相比铝箔有明显提高,感应电流峰值降低了 10³数量级。



图 12 不同材料屏蔽双绞线频域响应

根据上述仿真结果可以看出,不同类型线缆、不同线缆长度或不同屏蔽结构都会影响机箱内部线缆对外界场 强干扰的耦合能力,在产品设计前期加入仿真方法可提前识别到内部线缆在强电磁脉冲环境下的风险并针对风险 点进行优化整改,例如对于重要敏感线缆可以通过减小线缆长度或改良屏蔽结构有效提高其抗扰度。

4 结论

在复杂电磁环境的构成中,强电磁脉冲对电子设备的毁伤日益频繁。由于强电磁脉冲波形较难制备,因此对 电子设备进行强电磁毁伤试验费用较高,且整改、测试的循环流程将消耗过多时间和财力。利用仿真方法介入到 设备生产前期的 EMC 设计、整改及性能评估,可提高设备通过试验测试的可能性。本文将 3D 电磁场仿真及 2D 电路仿真相结合,得出设备级强电磁辐照敏感度仿真方法。基于本文提出的仿真方法,可获取空间及线缆上耦合 电流、电压的时域、频域特性,以及不同类型、不同结构线缆的屏效差异,可为设备强电磁防护提供参考及技术 指标。本仿真方法是一种通用方法,同样可适用于其他电子设备的强电磁辐照敏感度仿真分析。

参考文献:

- [1] 白海涛,杨文,高慧敏. 面向作战需求的战场电磁环境复杂度评估[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(3):481-485.
 (BAI Haitao,YANG Wen,GAO Huimin. Complexity evaluation of battlefield electromagnetic environment for combat[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(3):481-485.)
- [2] 高岩,于博. 复杂电磁环境特性[J]. 四川兵工学报, 2008,29(1):19-21. (GAO Yan,YU Bo. Complex electromagnetic environment characteristics[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2008,29(1):19-21.)
- [3] 李楠,张雪飞. 战场复杂电磁环境构成分析[J]. 装备环境工程, 2008,5(1):16-19. (LI Nan,ZHANG Xuefei. Constitution analysis of complicated electromagnetic environment in battlefield[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008,5(1): 16-19.)
- [4] 蔡勇,王兴光,郝建生,等.强电磁脉冲对军交运输指挥自动化系统的威胁及对策[C]// 第二届电磁环境效应与防护 技术学术研讨会.北戴河:[s.n.], 2011:78-80. (CAI Yong, WANG Xingguang, HAO Jiansheng, et al. Threats and countermeasures of the strong electromagnetic pulse to the military transportation command automation system[C]// The 2th Electromagnetic Environmental Effects and Protection Technology Symposium. Beidaihe, China:[s.n.], 2011:78-80.)
- [5] 龚亮亮. 军用电子装备对于强电磁脉冲的防护[J]. 舰船电子工程, 2004,24(z1):237-239. (GONG Liangliang. Military electronic equipment for strong electromagnetic pulse protection[J]. Ship Electronic Engineering, 2004,24(z1):237-239.)
- [6] 谭云华,王湃,石彩云,等. 特种飞机的强电磁脉冲防护仿真分析研究[C]// 第25届全国电磁兼容学术会议. 上海:[s.n.], 2015:88-94. (TAN Yunhua,WANG Bai,SHI Caiyun,et al. Simulation and analysis of strong electromagnetic pulse protection for special aircraft[C]// The 25th National Conference on Electromagnetic Compatibility. Shanghai:China:[s.n.], 2015:88-94.)
- [7] NIE Baolin, DU Ping'an, YU Yating, et al. Study of the shielding properties of enclosures with apertures at higher frequencies using the transmission-line modeling method[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, 53(1):73-81.
- [8] LIU Enbo,DU Ping'an,NIE Baolin. An extended analytical formulation for fast prediction of shielding effectiveness of an enclosure at different observation points with an off-axis aperture[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014,56(3):589-598.
- [9] 刘恩博,杜平安,周元,等.以 PCB 为干扰源的带孔机箱电磁辐射特性仿真研究[J]. 电子学报, 2015,43(3):611-614.
 (LIU Enbo,DU Ping'an,ZHOU Yuan,et al. Numerical simulation on the electromagnetic radiation performance of enclosure with apertures excited by PCB[J]. Acta Electronica Sinica, 2015,43(3):611-614.)
- [10] 刘恩博,王丹丹,陈珂,等.带缝隙腔体电磁谐振特性的仿真分析[J].中国科技论文, 2016,11(16):1808-1812. (LIU Enbo, WANG Dandan,CHEN Ke,et al. Simulation analysis on electromagnetic resonance characteristics of cavity with slots[J]. China Sciencepaper, 2016,11(16):1808-1812.)
- [11] 毛湘宇,杜平安,聂宝林. 基于 TLM 的机箱孔缝电磁屏蔽效能数值分析[J]. 系统仿真学报, 2009,21(23):7493-7497.
 (MAO Xiangyu,DU Ping'an,NIE Baolin. Numerical analysis for shielding effectiveness of computer enclosure with apertures based on TLM[J]. Journal of System Simulation, 2009,21(23):7493-7497.)
- [12] 康宁,姚利军,黄建领,等. RS105 试验装置的仿真与分析[C]// 第 23 届全国电磁兼容学术会议. 上海:[s.n.], 2014:172-175.
 (KANG Ning, YAO Lijun, HUANG Jianling, et al. RS105 test equipment simulation and analysis[C]// The 23th National Conference on Electromagnetic Compatibility. Shanghai: China:[s.n.], 2013:172-175.)
- [13] HOEFER W J R. The transmission-line matrix method—theory and applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 1985,33(10):882-893.

作者简介:



刘恩博(1987-),男,四川省乐山市人,博 士,高级工程师,从事 EMC 设计、仿真、测试、 整改一体化技术研究.email:liueb@grgtest.com.

张 钰(1991-),男,山西省临汾市人,工程师,主要研 究方向为电磁兼容测试及仿真. **李智深**(1978-),男,北京市人,高级工程师, 主要研究方向为数字通信.

陈 旗(1968-),男,四川省达州市人,工 程师,主要从事各种电器、机械以及航空机载产 品的 EMC 测试、设计、咨询、整改、系统分析 等工作.