

# 基于 CST 的抗扰度测试环境辐射电磁场仿真

周 雷<sup>1</sup> 陈 旻<sup>2</sup> 邓凌翔<sup>1</sup> 李保婷<sup>1</sup> 韩 沁<sup>1</sup> 颜 伟<sup>2</sup>

(1. 江苏省计量科学研究院产品检验所, 江苏 南京 210007)

(2. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

**[摘要]** 在 GB17626 中, 对雷击浪涌、电快速瞬变脉冲群等电磁抗扰度的测量都做了明确的规定。但是, 这些测试中的传输线上往往存在着高频信号引起的电磁场噪声, 严重地影响到了标准测试的准确性。借助 CST MWS 软件对相应的机理模型进行电磁场场强、远场辐射等的计算机仿真, 帮助工程测试人员理解电磁干扰的实际存在, 以提出解决应对的方法。

**[关键词]** 电磁干扰, CST MWS 软件, 时域有限积分法, 传输线噪声

**[中图分类号]** TM15 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-4292(2012)03-0018-05

## Radiated Electromagnetic Field in an EMS Test Environment Based on CST

Zhou Lei<sup>1</sup>, Chen Yang<sup>2</sup>, Deng Lingxiang<sup>1</sup>, Li Baoting<sup>1</sup>, Han Qin<sup>1</sup>, Yan Wei<sup>2</sup>

(1. Institute of Product Inspection, Jiangsu Metrology Institute of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

(2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** Nowadays, principles and standards for surge immunity and EFT test are set according to the EMC standards test such as GB17626. It also presents radiated interference of the high-frequency cable. Seriously radiated noise may affect the accuracy of the standard test. This paper tries to simulate electromagnetic field by CST MWS software. Engineers will understand radiated EMI noise analysis and suppression with the simulation result.

**Key words:** electromagnetic interference (EMI), CST MWS software, FIT, noise from cables

在 GB17626 中明确规定了关于电气电子产品的电快速瞬变脉冲群、雷击浪涌和周波电压跌落等电磁抗扰度的标准测试方法, 如图 1 所示。一般要求与测试产品相连的线缆应置于 10 cm 高的绝缘支撑上, 线缆长度应为 50 cm, 绝缘支撑置于 GRP 上<sup>[1]</sup>。但是, 往往发生器产生的信号的高频成分通过 50 cm 线缆后, 易产生电磁辐射干扰, 从而严重影响抗扰度试验环境, 不利于测试结果的准确度。

经过模型的初步建立, 可以简化成图 2 所示的抗扰度试验环境辐射干扰机理模型。

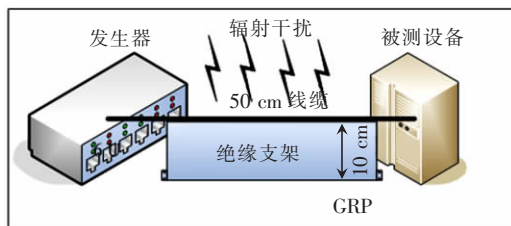


图 1 抗扰度标准测试简化示意图

Fig.1 Simple illustrate for EMS test

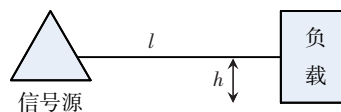


图 2 抗扰度试验环境辐射干扰机理模型

Fig.2 Topology of radiated field in an EMS test environment

其中, 信号源为等效的电快速瞬变脉冲群发生器;  $l$  为传输线缆的长度;  $h$  为传输线缆相对 GRP 平面的距离; 负载为简化的被测设备。根据不同的被测设备, 可以表现为纯阻性、阻容性和阻感性的特质。

理论上, 该模型属于电小尺寸, 其最大辐射电磁场场强为<sup>[2]</sup>:

收稿日期: 2012-06-15.

基金项目: 国家质检总局项目、江苏省研究生培养创新工程(CXZZ12\_0404、CXLX12\_0411).

通讯联系人: 周 雷, 博士, 工程师, 研究方向: 电磁兼容. E-mail: zhousunlei@yahoo.cn

$$|E| \approx \sqrt{30R_{\text{rad}}} \frac{I}{r}, \quad (1)$$

考虑到 GRP 反射问题, 上述计算需乘以 2 作为补偿, 即:

$$|E| \approx \sqrt{30R_{\text{rad}}} \frac{2I}{r}, \quad I = \frac{U}{Z}. \quad (2)$$

但是, 实际中很难借助工具测量出传输线缆因为射频信号而在周围空间中产生的电磁场干扰. 随着一系列工程电磁场计算机仿真软件的出现, 借助计算机的辅助计算仿真出抗扰度试验环境辐射干扰情况就成为可能. 不但对抽象的概念建立了感观认识, 且具有简单、实用和成本低廉的优点. 本文正是利用基于 CST(Computer Simulation Technology) 电磁仿真软件, 建立如图 2 所示的机理模型, 采用时域积分法求解器对其周围的电磁场进行仿真.

## 1 时域积分法(FIT)求解

应用电磁场数值计算常见的有时域积分法(FIT)、时域有限差分法(FDTD)、矩量法(MoM)等<sup>[3-4]</sup>. 有限积分技术的理论于 1976~1977 年间首先提出, 该数值方法提供了一种通用的空间离散化方案, 非常适用于解决各种电磁场的问题. CST MWS 恰是以时域有限积分技术为理论基础设计出来的电磁场仿真软件.

FIT 法通过将 Maxwell 积分方程组离散化来进行数值求解.

首先, 定义一个有限的计算区域, 该区域包含了整个计算的问题. 生成一套网格, 将计算区域分割为许多小的网格单元. 以正交六面体网格为例, 其包含了两套相互嵌套、相互正交的网格, 称之为基网格(Primary Grid)和伴随网格(Secondary Grid). CST 中看到的网格视图(Mesh View)正是基网格.

如图 3 所示, 麦克斯韦方程在每个网格上进行离散<sup>[5]</sup>. 法拉第电磁感应定理等式的左边的回路积分表示为 4 个基网格棱边的电压和, 等式右边看成前面 4 个棱边所包含的基网格面磁通的时间偏导. 将此推广到所有的基网格面, 写出矩阵形式, 同时定义一个与解析旋度算子对应的矩阵  $C$ , 便可以得到所示的矩阵形式, 称为离散旋度算子.

如图 4 所示, 麦克斯韦方程组中其余的方程也基于时域有限积分的方法, 离散化成麦克斯韦的网格化方程组. 相比于解析形式的麦克斯韦方程组, 不难发现这两种表述方式非常相似. 更为难得的是, 离散化的过程中, 并未引入任何近似.

$$\oint_{\partial A} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = - \frac{\partial}{\partial t} \iint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \rightarrow \begin{array}{c} \xrightarrow{e_i} \\ \xleftarrow{e_j} \\ \xrightarrow{e_k} \\ \xleftarrow{e_l} \end{array} \rightarrow$$

$$e_i + e_j - e_k - e_l = - \dot{b}_n \rightarrow$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}}_C \begin{bmatrix} e_i \\ e_j \\ e_k \\ e_l \end{bmatrix} = - \frac{d}{dt} \underbrace{\begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ b \\ \cdot \end{bmatrix}}_{-b} \rightarrow C \cdot e = - \dot{b}$$

图 3 网格化过程图示

Fig. 3 Grid processing

$$\begin{aligned} \oint_{\partial A} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} &= - \frac{\partial}{\partial t} \iint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \\ \oint_{\partial A} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} &= \iint_A \left( \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \right) \cdot d\mathbf{A} \rightarrow \begin{cases} C e = - \dot{b} \\ \tilde{C} h = \dot{d} + j \\ S b = 0 \\ \tilde{S} d = q \end{cases} \\ \oint_{\partial V} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} &= 0 \\ \oint_{\partial V} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} &= Q \end{aligned}$$

图 4 麦克斯韦方程组网格化结果

Fig. 4 Maxwell's grid equations(MGEs)

相比于传统的时域有限差分法(FDTD), 时域有限积分法不单单适用于直角坐标系网格, 结构理想边界拟合技术后保持了结构化直角坐标系网格的所有点, 并且可以对其进行曲线结构的精确建模.

## 2 仿真模型创建

### 2.1 干扰机理模型的创建

基于图 2 抗扰度试验环境辐射干扰机理模型, 在 CST MICROWAVE STUDIO 环境下创建新的文件, 并以表 1 所示的模型参数创建对应的模型, 如图 5 所示.

## 2.2 提高仿真效率的方法

机理模型的建立只是仿真的第一步,定义边界条件和对称面、剖析网格大小等仿真参数决定了仿真的速度和效率.

一般地,求解电磁场问题总是假定问题空间是无限大.在采用时域有限积分算法计算时,所取研究空间越大,需要的存储量也就越大,计算时间也就越长.由于计算机硬件条件的限制,实际上不可能模拟无限大的空间,因此网格总要在某处被截断.不合理的截断对计算结果影响很大,因此希望通过边界处理办法,使得空间的截断不影响或尽可能小地影响对实际问题的模拟<sup>[6]</sup>.在 CST 中,对结构的仿真必须在此结构边界框的内部进行,设定为开阔场.除了边界面,还需要设置对称面.本文的模型选择关于 YZ 面对称,且参数为磁壁(magnetic),采用同轴线的基模激励,这样减少了一半的仿真时间.设置后的效果如图 6(a) 所示.

设定完所有的仿真参数后,专家系统经过结构分析后会自行剖分网格,以便时域有限积分算法的形成.可以进入网格查看模式观察网格的剖分情况,本次仿真的网格结果如图 6(b) 所示.

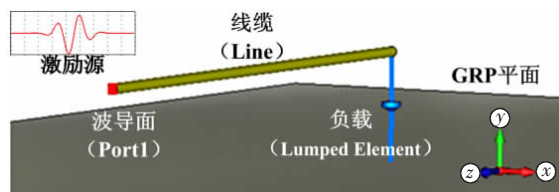


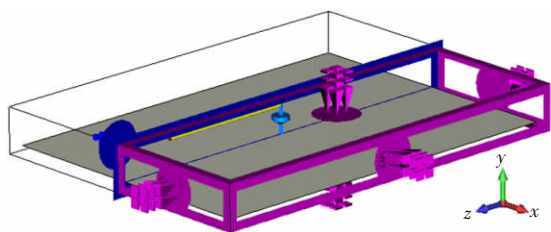
图 5 CST 模型

Fig.5 CST model

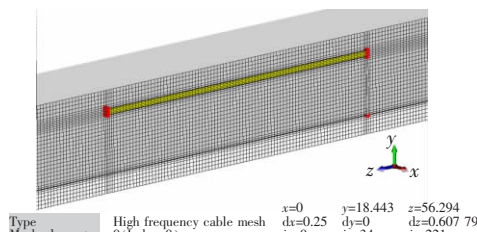
表 1 CST 模型基本参数

Table 1 Fundamental parameters

项目	英文标识	名称	参数
线缆	Line	长度	50 cm
		半径	0.1 cm
		离地面高度	10 cm
		材料	铜
负载	Lumped Element	纯阻性	50 $\Omega$
		阻感性	50 $\Omega$ + 1H
		阻容性	50 $\Omega$ + 10F
频段	Frequency	最小值	1 GHz
		最大值	5 GHz
波导面	Waveguide Port	等效阻抗	50 $\Omega$
激励源	Processing Excitation	激励信号	高斯脉冲



(a) 定义边界条件和对称面



(b) CST 自动剖分网格的结果

图 6 仿真参数设置的结果

Fig.6 Simulation setting result

## 3 仿真结果

### 3.1 电磁场强度

如图 7 所示,在笛卡尔坐标系中,选择了 3 个位置,即位置 1(0,20,0)、位置 2(0,20,25)和位置 3(0,20,50),设置电磁场场强探头(Probe).发挥了 CST 分析复杂环境的辐射电磁场特性具有很好的适应性的优点<sup>[7]</sup>.

纯阻性、阻感性、阻容性 3 种负载对应的电磁场场强如图 8 和表 2 所示.显然,3 种负载的情况在 1~5 GHz 的频段内不同频率点的电磁场场强是不同的,这就对抑制传输线缆上带来的电磁辐射干扰增加了难度.总体来看,3 个位置的电磁场场强的随着频率的变化趋势基本相似,说明在辐射干扰时存在着共性的问题.3 种负载的最大值均出现在位置 2(0,20,25),且频率点也略大于 4 GHz.为抵抗辐射电磁干扰提供的定性定量的参考.

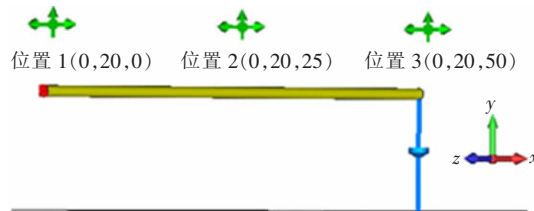


图 7 3 个电磁场场强探头位置

Fig.7 Three probes position

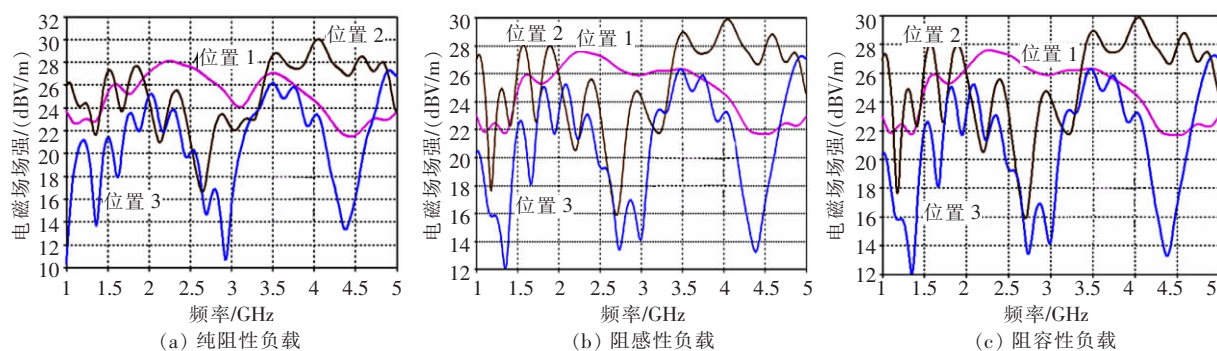


图 8 3 个测试点的电磁场场强仿真曲线

Fig.8 E-Field graphs of three probes

表 2 3 个测试点主要频点 (GHz) 的电磁场场强仿真数据

Table 2 E-Field data of three probes in main frequency (GHz)

负载	场强 (dBV/m)	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
纯阻性	位置 1	23.73	25.28	27.11	27.57	24.65	27.02	24.64	21.60	23.67
	位置 2	25.91	27.13	21.24	21.24	22.20	28.62	29.73	27.75	23.63
	位置 3	10.32	21.37	25.04	20.00	15.31	26.16	23.26	16.04	26.78
阻感性	位置 1	23.04	24.75	26.32	27.26	25.88	26.30	24.57	21.67	22.99
	位置 2	26.86	26.37	26.03	23.29	24.32	28.93	29.67	27.80	24.51
	位置 3	20.32	22.05	23.17	19.32	14.17	26.21	23.16	16.72	27.02
阻容性	位置 1	22.88	25.14	27.08	27.44	24.48	24.99	24.68	21.77	23.87
	位置 2	25.70	25.54	24.97	21.75	22.62	28.32	29.67	27.75	24.51
	位置 3	19.99	20.17	23.21	19.73	15.05	25.61	22.50	17.13	27.22

### 3.2 三维远场图

图 9 给出了 3 种负载的辐射三维远场图. 在仿真中, 选取了 3 GHz 作为观察辐射方向性的频率点, 显示全空间的方向系数<sup>[8]</sup>. 其增益分别为: 14.74 dBi、14.20 dBi、11.25 dBi. 其增益的趋势均为激励源输入端低于负载端. 其结果对于后续的电磁场干扰的诊断和抑制提供了依据.

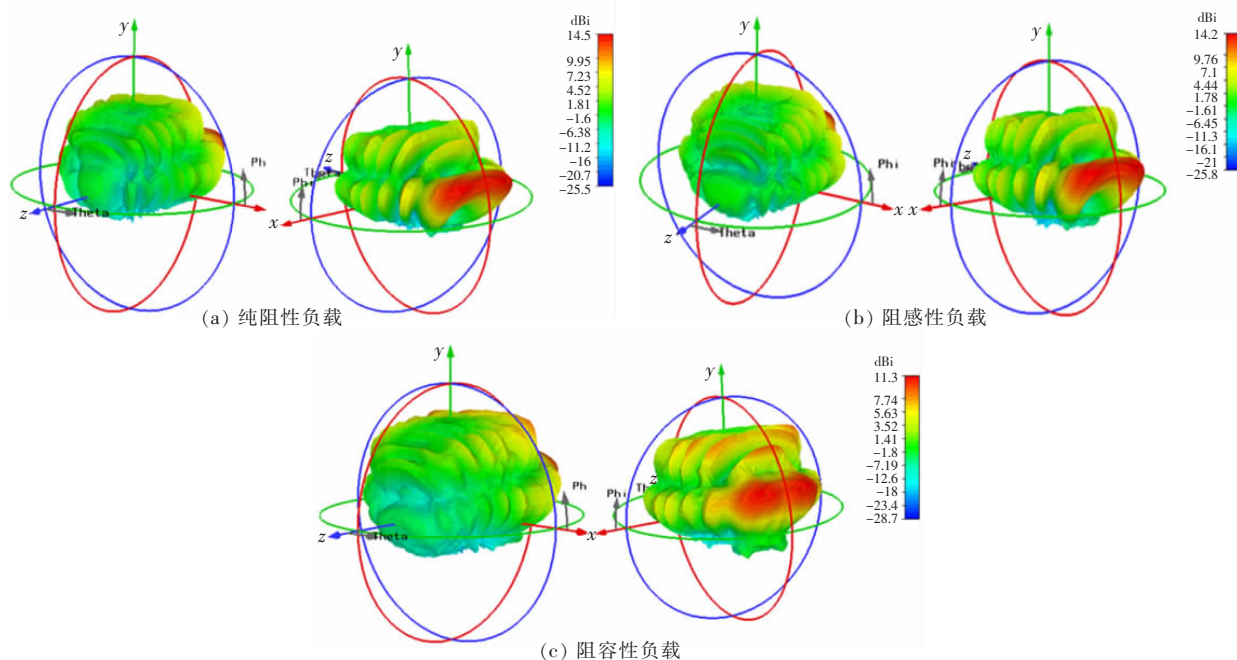


图 9 三维远场图仿真结果

Fig.9 3D result of farfield

## 4 结论

本文研究了抗扰度试验环境辐射干扰,并采用了 CST MWS 软件针对机理模型进行了电磁场场强、远场辐射的计算机仿真. 结果表明: 不同负载在高频环境下,抗扰度试验中的传输线上各个位置产生的电磁场干扰是不同的,而且因为负载非理想环境下的阻抗值的模等基本参数的不同,很难直接从理论上得出干扰的效果. 电磁场仿真软件 CST 能够对其有效地进行评估,为以后的高频辐射干扰的诊断和抑制提供了一定的参考.

### [参考文献](References)

- [1] 中国国家标准化管理委员会. GB 17626.4-2008,电磁兼容试验和测量技术电快速瞬变脉冲群抗扰度试验[S]. 北京: 中国标准出版社,2008.  
SAC, Committee for Standardization in China. GB 17626.4-2008, EMC on EFT Test[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [2] Paul C R. Introduction to Electromagnetic Compatibility[M]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, Inc 2006: 565-570.
- [3] Weiland T. Time domain electromagnetic field computation with finite difference methods[J]. International Journal of Numerical Modeling, 1996(9): 295-319.
- [4] See K Y, Freeman E M. Rigorous approach to modeling electromagnetic radiation from finite-size printed circuit structures[J]. IEEE Proceedings on Microwaves, Antennas and Propagation, 1999, 146(1): 29-34.
- [5] Weiland T. RF and microwave simulators—from component to system design[C]// Proceeding of the European Microwave Week (EUMW2003). Munchen, 2003: 591-596.
- [6] 张敏. CST 微波工作室用户全书[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2004.  
Zhang Min. CST Microwave Studio User Book[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2004. (in Chinese)
- [7] 颜伟, 赵阳, 王恩荣, 等. 射频识别系统电磁辐射干扰特征快速分析与抑制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(21): 161-166, EI.  
Yan Wei, Zhao Yang, Wang Enrong, et al. Analysis and suppression on radiated EMI noise for radio frequency identification systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(21): 161-166, EI. (in Chinese)
- [8] 刘广东, 吕思潼, 汪洪艳, 等. 基于 CST 的偶极子天线虚拟实验[J]. 大学物理实验, 2011, 24(4): 58-60.  
Liu Guangdong, LYU Sitong, Wang Hongyan, et al. Virtual experiment of dipole based on CST[J]. Physical Experiment of College, 2011, 24(4): 58-60. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]