

全波算法在电快速脉冲群测试中的应用

陈道升¹, 邓凌翔¹, 周 雷¹, 陈 旻², 颜 伟², 窦爱玉²

(1. 江苏省计量科学研究院产品检验所, 江苏 南京 210007)
(2. 江苏省电气装备电磁兼容工程实验室(南京师范大学), 江苏 南京 210042)

[摘要] 全波算法又称低频或精确算法,它是求解电磁兼容问题的精确方法.借助全波算法中的时域有限积分算法(FIT)与完美边界逼近技术(PBA)的结合,将电快速脉冲群测试中的电磁兼容问题作了深入的理论研究和成因分析.最后通过理论仿真和实验结果的对比验证全波算法在电快速脉冲群测试中应用的可行性.

[关键词] 全波算法,电快速脉冲群测试,电磁兼容,完美边界逼近技术

[中图分类号] TM15 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2013)01-0007-04

Full-Wave Algorithm Applied to EFT Test

Chen Daosheng¹, Deng Lingxiang¹, Zhou Lei¹, Chen Yang², Yan Wei², Dou Aiyu²

(1. Institute of Product Inspection, Jiangsu Metrology Institute of Science and Technology, Nanjing 210007, China)
(2. Jiangsu Electronic Equipment EMC Engineer Lab (Nanjing Normal University), Nanjing 210042, China)

Abstract: Full-wave algorithm is also called low frequency algorithm or accuracy algorithm. It is a common algorithm to solve and simulate EMC task. This paper uses FIT, one kind of full-wave algorithms, and perfect boundary approximation technology to make theoretical investigations and cause analyses of EMC noise by EFT. Finally, contrastive study on simulations and experiments has verified that full-wave algorithm suits for applying to EFT test.

Key words: full-wave algorithm, EFT test, EMC, perfect boundary approximation technology

在快速瞬变脉冲群测试中,采用的是一串脉冲信号.频率信息比较丰富,尤其脉冲群的脉冲上升沿很陡,脉宽很窄,造成高频信息非常丰富,由此会带来一系列的电磁兼容问题.本文借助全波算法求解其带来的电磁兼容问题,并与实际测量的结果相对比,为完善该测试提供帮助.

1 全波算法的网格边界逼近

全波算法就是求解麦克斯韦方差完整形式的算法.全波算法分成时域算法和频域算法.有限差分法(FDTD)、有限积分法(FIT)、有限元法(FEM)均属于全波算法.但是对于给定的计算机硬件资源,全波算法所能计算的电尺寸有其上限.在没有任何限制条件下,即任意结构任意材料下,FIT算法能够仿真的电尺寸最大,其次是FDTD算法,再者为FEM算法^[1,2].

所有的全波算法均需要对仿真区域进行体网格或面网格分割.FIT算法是时域显示算法,且稀疏矩阵,仿真时间与内存均正比于网格数的一次方;相比于频域隐式算法的仿真时间和内存正比于网格数的平方这一特点,其仿真时间要大大缩短.根据文献[3]的理论,图1展示了常见的集中边界逼近技术的效果.

传统的四面体网格的FEM算法对于曲面逼近良好,但是对于大网格数的仿真效率很低、内存消耗大;而经典的FDTD阶梯六面体网格在出来大网格时效率高,但在任意曲面结构时精度降低.如果将FIT算法和PBA技术相结合,就能保证逼近的精确性和快速性.如图2所示,对于同一个球体的网格逼近,FIT+PBA的组合优势十分明显.

收稿日期:2012-11-20.
基金项目:国家质检总局项目、江苏省自然科学基金(BK2011789)、毫米波国家重点实验室开放基金(K201309)、江苏省研究生培养创新工程(CXZZ12_0404、CXLX12_0411).
通讯联系人:邓凌翔,高级工程师,研究方向:电力电子、电磁兼容. E-mail: marmot23@163.com

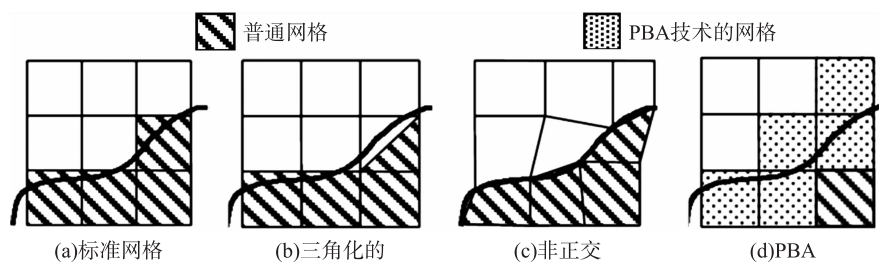


图 1 网格的边界逼近

Fig. 1 Grid approximations of rounded boundaries

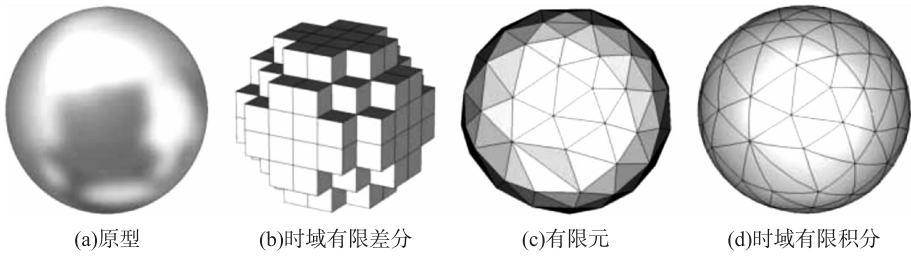


图 2 不同算法的曲面逼近

Fig. 2 Curve approximations by different algorithms

综上,FIT 算法和 PBA 技术在电磁场仿真中的优势,使得 FIT 算法的网格划分是所有全波算法中对仿真时间影响最小的. 并且针对在电快速脉冲群的测试中,无论是设备还是线缆,均属于电大尺寸的范围. 故综合考虑,决定采用全波算法中的时域有限积分法(FIT)来求解问题.

2 电快速脉冲群测试中电磁干扰成因分析

GB17626.4—2008 规定了关于电气电子产品的电快速瞬变脉冲群电磁抗扰度的标准测试方法^[4]. 其测试布局如图 3 所示,被测设备相连的线缆应置于 10 cm 高的绝缘支撑上,线缆长度应为 50 cm,绝缘支撑置于 GRP 面上. 实际测试中发现,快速瞬变脉冲群产生的电磁干扰环境更加严苛,因此本工作中将主要针对脉冲群信号进行分析. 标准中规定了快速瞬变脉冲群的干扰信号波形的上升沿和脉宽,以及各参数的允差范围如表 1. 图 4 表示出了脉冲群的单个脉冲图.

表 1 GB17626.4 中规定的脉冲群的信号波形参数

Table 1 EFT signal in GB17626.4

负载情况/ Ω	上升时间/ t_r	持续时间/ t_d
50	5(1±30%) ns	(50% 值); 50(1±30%) ns
1 000	5(1±30%) ns	(50% 值); 50(1±30%) ns

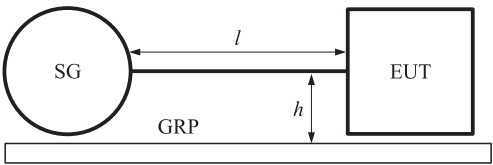


图 3 测试布局

Fig. 3 Testing layout

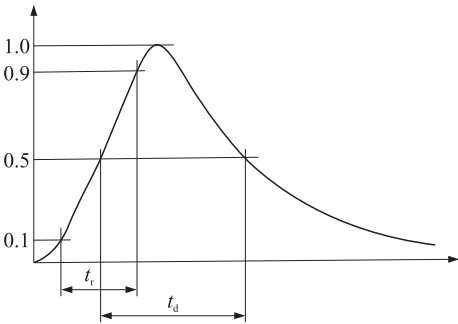


图 4 脉冲群的信号波形

Fig. 4 EFT wave shape

由图 4 可得脉冲波形时域信号为:

$$V(t)\begin{cases} t\times10^9 & 0\leq t\leq4.4\times10^{-9} \\ 4.4e^{-0.11\times10^9(t-4.4\times10^{-9})} & 4.4\times10^{-9}\leq t\leq1\,000\times10^{-9} \end{cases}$$

(1)

式中, $V(t)$ 为脉冲波形幅值/ V ; t 为脉冲波形的时间/ s .

对图 4 的脉冲波形采用如下傅里叶变换,其公式为:

$$F(\omega)=\int_0^{\tau}V(t)e^{-i\omega t}dt=F[V(t)],$$

(2)

将式(1)代入式(2),可得:

$$F(\omega)=\int_0^{4.4\times10^{-9}}t\times10^9e^{-i\omega t}dt+\int_{4.4\times10^{-9}}^{1\,000\times10^{-9}}4.4e^{-0.11\times10^9(t-4.4\times10^{-9})}e^{-i\omega t}dt,$$

(3)

求解上式,可得:

$$F(\omega)=\left[\frac{1}{\omega^2}(10^9+4.4\omega i)e^{-i4.4\times10^{-9}\omega}-\frac{10^9}{\omega^2}\right]+\frac{4.4(0.11\times10^9-i\omega)}{0.0121\times10^{18}-\omega^2}e^{-i4.4\times10^{-9}\omega}.$$

(4)

只关注幅度信息,则:

$$A(f)=\left\{\left[\frac{10^9}{(2\pi f)^2}+\frac{0.484\times10^9}{0.0121\times10^{18}-(2\pi f)^2}-\frac{10^9\cos8.8\pi\times10^{-9}f}{(2\pi f)^2}\right]^2+\left[\frac{4.4}{2\pi f}-\frac{8.8\pi f}{0.0121\times10^{18}-(2\pi f)^2}-\frac{10^9\sin8.8\pi\times10^{-9}f}{(2\pi f)^2}\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}}.$$

(5)

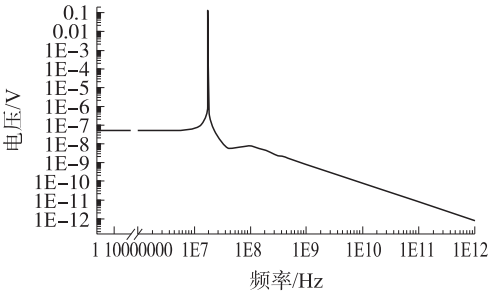


图5 单个脉冲波形的傅里叶变换

Fig. 5 Fourier transform of signal EFT wave

3 仿真与实验结果的对比分析

基于图 3 的布局要求,首先建立仿真模型. 在 PBA 技术的划分下,该模型共划分为 63 936 个网格,如图 6(a)所示. 在 VBA 的宏编辑环境下,以图 4 和式(1)为依据,编写仿真的电快速脉冲激励源,如图 6(b)所示.

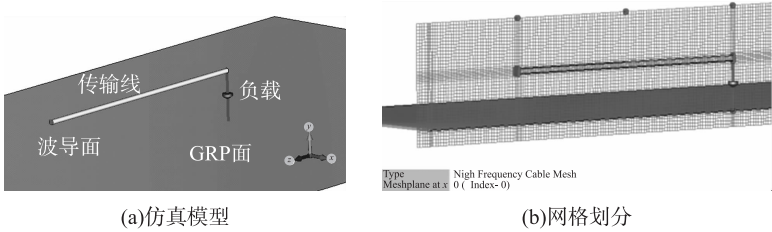


图 6 仿真建模

Fig. 6 Modeling by simulating

图 7 展示了实验中的布局. 按照标准中的规定,分别接 50 Ω 和 1 000 Ω 的纯阻性负载,最终将仿真的结果与实验室实际测量的结果相对比分析.

实验时,在负载的不同位置都摆放了频谱仪的探头进行测量,仿真时也相对应地摆放了探针. 其中噪声最大的结果如图 8 所示的仿真结果和实验结果. 无论何种负载、仿真结果与实验结果的趋势几乎一致,整体呈逐渐下降趋势,约至 200 MHz 幅值后的噪声幅值几乎为低噪,可以将其忽略. 50 Ω 负载相比于 1 000 Ω 负载整体上幅值要略大. 最大的频点均出现在 1 MHz 附近,不同负载的对比结果如表 2 所示. 其他测试点检测到的噪声频谱信息与 EUT 测试点有较大差异. 在低频处信号强度基本相近,随着频率增高,其他测试点的干扰信号逐渐减弱.



图 7 实验布局

Fig. 7 Experiment layout

表 2 仿真与实验结果对比

Table 2 Simulation result comparison with experiment result

负载	单位	仿真结果	实验结果
50 Ω	原始单位	-55 dBV/m	-38 dBmW
	统一单位	65 dBμV/m	69 dBμV/m
1 000 Ω	原始单位	-75 dBV/m	-41 dBmW
	统一单位	45 dBμV/m	66 dBμV/m

究其原因,是因为在低频段,其他检测点的位置到 EUT 的距离很近,可以认为是近场辐射. 电场强度与 EUT 处非常接近,只是相位角存在一些差异. 而到了高频段,基本上已经进入远场辐射范畴,则辐射功率与距离平方成反比,所以迅速下降. 仿真结果与实验结果非常好地吻合,某种程度上也证明了全波算法在该电磁兼容问题上的结果是准确、可靠的.

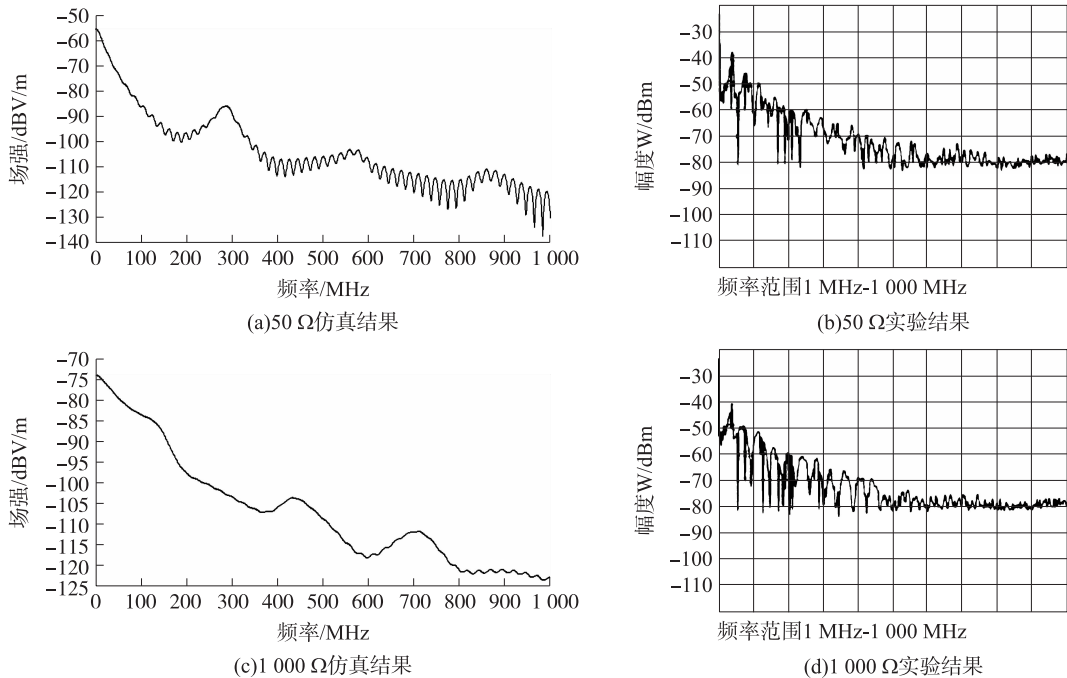


图 8 仿真与实验结果
Fig. 8 Simulation and experiment result

4 结语

本文借助全波算法中的时域有限积分算法(FIT)和完美边界逼近技术(PBA)的结合,将电快速脉冲群测试中的电磁兼容问题作了深入地研究,研究了噪声产生的原因,即 GB17626.4 中规定的脉冲群的信号波形的上升沿和下降沿所包含的高频成分,并对其进行了傅里叶分解. 理论仿真和实验结果与傅里叶分析结果从整体来看有一定的吻合度,干扰信号强度随频率变化趋势基本相近. 但是也存在差异,这是多方面原因造成的,主要是实验布置产生的辐射周边环境与仿真的环境有所差异. 总体上,可以证明全波算法适用于电快速脉冲群测试中电磁兼容问题的研究. 后期,将继续借助全波算法等工程电磁的理论研究分析更加深入的问题.

[参考文献](References)

[1] 李凌云,毛军发. 开放结构的特征值全波算法[J]. 微波学报,2003,19(4):30-33.
Li Lingyun, Mao Junfa. Full-wave eigenvalue method applied in open structure[J]. Journal of Microwaves, 2003, 19(4): 30-33. (in Chinese)

[2] Weiland T. Time domain electromagnetic field computation with finite difference methods[J]. IEEE International Journal of Numerical Modeling, 1996(9): 295-319.

[3] Krietenstein B, Schuhmann R, Thoma P, et al. The perfect boundary approximation technique facing the challenge of high precision field computation[C]//Proceedings of the XIX International Linear Accelerator Conference (LINAC'98), Chicago, 1998: 860-862.

[4] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 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: 1-8.
Committee for Standardization in China. GB/T 17626. 4—2008, Electromagnetic Compatibility-testing and Measurement Techniques-electrical Fast Transient/Burst Immunity Test[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 1-8. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]