

文章编号: 2095-4980(2020)06-1045-06

高频强场源对天馈系统的电磁耦合效应仿真

季涛¹, 罗建书^{*2}, 侯木舟³

(1.中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院, 上海 201210; 2.湖南交通工程学院 高科技研究院, 湖南 衡阳 421009;
3.中南大学 数学与统计学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 为获得天馈系统附近给定设备内部可能引起的电磁干扰的估计值, 从而优化天馈系统的设计参数, 采用 COMSOL 中的磁场模块, 模拟完整天馈子系统在受到外部电磁场作用而激发出的电场强度和电流密度。模型空间采用无限元域截断, 感应电流主要分布在天馈子系统固体的内外表面, 其值一般在 650 A/mm^2 左右, 天馈子系统固体内部的感应电流小于 6 A/mm^2 。对于壁面较薄的区域, 固体内部的感应电流亦较大。仿真结果表明, 天馈子系统对于外界辐射电磁源的耦合电磁效应主要集中在固体部分的表面, 从而引起信号的改变, 对误码率的作用较大。

关键词: 电磁耦合; 网格划分; 仿真; 天馈系统

中图分类号: TN015; TM15

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019266

Simulation of electromagnetic coupling effect of high frequency and strong field source on antenna feed system

Ji Tao¹, Luo Jianshu^{*2}, Hou Muzhou³

(1.Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China Ltd, Shanghai 201210, China;
2.High Technology Research Institute, Hunan Traffic Engineering College, Hengyang Hunan 421009, China;
3.School of Mathematics and Statistics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: The purpose of this study is to obtain the estimation of the electromagnetic interference caused by the antenna feed system to the given equipment nearby, so as to optimize the design parameters of the antenna feed system. In this study, the magnetic field module in COMSOL is utilized to simulate the electric field intensity and current density excited by the whole antenna feed system under the external electromagnetic field. The model space is truncated by infinite element domain. The induced current is mainly distributed on the inner and outer surface of the solid of the antenna feed subsystem, and its value is generally about 650 A/mm^2 , while the induced current in the solid of the antenna feed subsystem is less than 6 A/mm^2 . For the region with thin wall, the induced current in the solid is also large. For a given excitation, the wave reaches two line probes at the same time and produces induction current. The simulation results show that the coupling electromagnetic effect of the antenna feed subsystem on the external radiation electromagnetic source is mainly concentrated on the surface of the solid part, which causes the signal to change and has a great effect on the bit error rate.

Keywords: electromagnetic coupling; grid division; simulations; antenna feed system

针对高频强场辐射源所形成的复杂电磁环境对电子系统所形成的电磁威胁以及易损性评估, 文献[1]强调了数值模拟与仿真的重要性; 王鹏等在文献[2]中提出了针对高功率电磁脉冲环境的系统级电磁效应评估与技术的发展途径。HU 等在 2017 年的微波、天线、传播与电磁兼容技术国际会议上提出了某导航贴片天线受不同电磁脉冲照射后的输出时域波形信号的仿真数据及其分析结果^[3]; Lorena Lozano 等利用电磁仿真工具, 基于矩方法, 模拟了大型商用喷气式飞机和旋翼飞机的机身对航空卫星信道的效应, 包括脉冲响应、窄带信号与宽带信号的

收稿日期: 2019-07-26; 修回日期: 2019-09-22

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(11271370)

作者简介: 季涛(1961-), 男, 高级工程师, 从事电磁环境防护以及通信、电磁兼容、综合电子战仿真等专业技术工作。email:jitao@comac.cc

*通信作者: 罗建书 email:jshluo@126.com

时间信道变化^[4]；LUAN 等在文献[5]中，关于相控阵雷达的高空核电磁脉冲(High altitude Electromagnetic Pulse, HEMP)的防护技术研究，提出了电磁拓扑和决策试验与评估相结合的方法，降低了确定耦合路径的难度。左超等在解决一箭多星的电磁兼容问题时，通过建立天线模型和透波口模型以及仿真，确定转发天线的最佳架设方位^[6]；向振宇等研究了天线耦合干扰对传输线网络的电磁效应，得到一种计算复杂传输线网络终端频域及时域响应的方法^[7]；PARMANTIER J P 在文献[8]中讨论了传输线模型中产生等效分布源的集成电压源问题，通过对单导体传输线模型在短路/短路、匹配/匹配、短路/开路 3 种特殊条件下的解析解进行了论证，证明了基于 BLT(Baum-Liu-Tesche)的 MTLN 公式的低频解析解与等效电路公式完全相容；文献[9]介绍了线缆束电磁耦合计算的电磁拓扑方法；Diamonde K 等在文献[10]中介绍了用于多导体传输线网络电磁耦合计算的 CRIPTE 和用于设备输入阻抗建模的 IMEA 两个软件，并给出了这两个软件用于分析 10 kHz ~ 400 MHz 频率范围内的大电流注入试验的结果；文献[11]利用电磁拓扑方法和矩方法，分析和计算了具有多孔腔体中的双导线的电磁耦合效应；ZHANG 等利用迭代算法计算了埋于地下的导体对电磁场的耦合效应^[12]；TONG 等在文献[13]中基于 Daubechges 标度函数推导了双导体无损传输线方程的多分辨时域计算方法，并提出一种在终端和线路终端附近生成方案的方法。ZHANG 等采用半解析方法计算无损多导体传输线在非线形载荷作用下的瞬态响应，并通过实例验证了其方法的有效性^[14]。文献[15]基于多导体传输线的标度函数，导出了多导体传输线方程的多分辨时域格式，采用粗空间步长的时域有限差分(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)格式计算了多导体传输线的电磁耦合。本文基于散射电场强度的 Helmholtz 方程，利用多物理场计算的 COMSOL 软件，对天馈系统在高场强源辐射下的耦合效应进行仿真计算。

1 几何模型

仿真的天馈系统由喇叭天线、圆形到矩形波导适配器、测试耦合器、功分器和定向耦合器组成，如图 1(a)从左至右所示。对几何模型进行 1:1 建模，如图 1(b)所示。

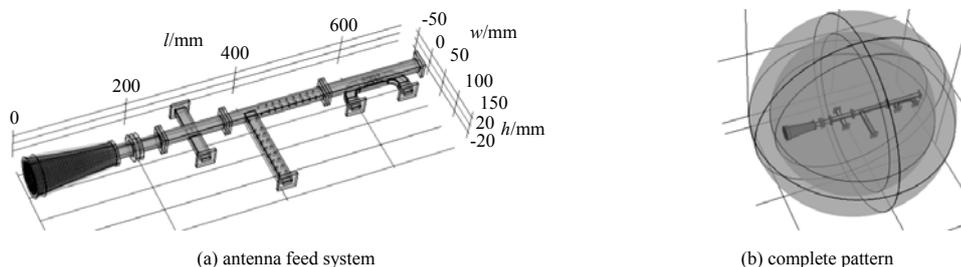


Fig.1 Model of antenna feed system
图 1 天馈系统模型

背景场应用“磁场”接口中的约化场公式。模型空间由无限元区域截断，即近似扩展到无限大空间的域条件。在使用“无限元域”特征时，因其放置在较远的物理距离处，建模域外部的边界条件对解的影响非常小。

2 各部分材料

天馈系统外层的一层球壳即为无限元域，其内工质为可缩放的空气。图 2 给出了天馈系统不同部位的材料。

由于研究的频率在 GHz 级别，黄铜和铝的集肤效应深度在微米级别。空气的属性为 $\epsilon_r=1, \mu_r=1, \sigma=0$ S/m，表示集肤深度无限大。为提高求解器的稳定性，本模拟中使用的空气的人工电导率很小，但非零($\sigma=0.1$ S/m)。

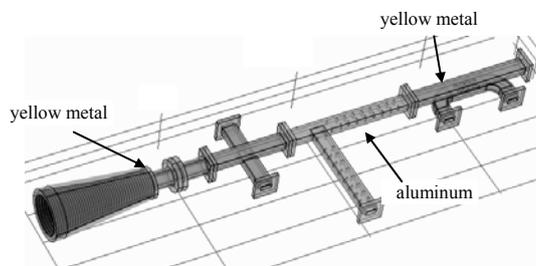


Fig.2 Material of antenna feed system
图 2 天馈系统所用材料

3 参数、边界条件与控制方程

在“全局定义—参数 1”中输入模型计算、建模等步骤中需要的参数及对应值。本模型中输入频率 f 和场强 E_b 。由于物理模型较为复杂，不在此处定义参数。

磁场控制方程如下：

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \mathbf{B} = \nabla \times (\mathbf{A}_b + \mathbf{A}_r) \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + j\omega D + \mathbf{J}_e \\ \mathbf{E} = -j\omega (\mathbf{A}_b + \mathbf{A}_r) \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{B} 为均匀磁通密度; \mathbf{A} 为矢量磁势; $\mathbf{A}_b, \mathbf{A}_r$ 分别为背景电场和耦合电场所对应的矢量磁势; \mathbf{J} 为电流密度, \mathbf{J}_e 为传导电流密度; \mathbf{H} 为磁场强度; ω 为圆频率; D 为电位移; σ 为电导率。

阻抗边界条件的控制方程如下:

$$\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega}}} \mathbf{n} \times \mathbf{H} + \mathbf{E} - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) \mathbf{n} = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_s) \mathbf{n} - \mathbf{E}_s \quad (2)$$

式中: ϵ_r 为相对介电系数; ϵ_0 为真空中介电常数; μ_r 为相对磁导率; μ_0 为真空中磁导率; \mathbf{n} 为外法向量; \mathbf{E}_s 为源电场。

4 网格剖分

由于几何模型形状复杂不规则,故采用四面体网格进行剖分,采用自定义的网格大小和边界上的节点分布以达到相对较高的网格质量。

建模过程中,将模型分为5部分,分别是喇叭天线(第一部分)、矩圆转换器(第二部分)、测试耦合器(第三部分)、功分器(第四部分)和定向耦合器(第五部分)。在组件1中,右键单击“网格”选择“自由四面体网格”;在“域选择”中,单击右侧图形界面选取第一部分对应的模块,在“标签”栏中将其命名为“第一部分自由四面体网格”。将其展开,单击“尺寸”,在“单元大小”中单击“定制”,在“单元大小参数”中将“最大单元大小”设置为2 mm;右键单击“第一部分自由四面体网格”,选择“分布”,在“边选择”中,单击左侧图形界面中第一部分所有的圆形边(为方便选择,可用图形界面中的“选择框”全部选定),在“分布”中选择“固定单元数”,将“单元数”设置为50。单击“构建选定对象”,第一部分网格如图3(a)所示。

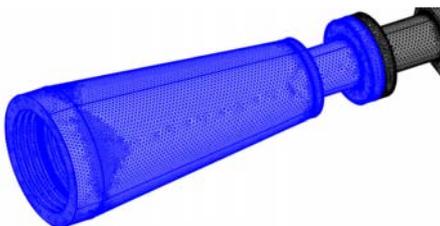
第二部分与第一部分的剖分过程完全相同,在此不再赘述,剖分网格如图3(b)所示。

第三部分的最大尺寸与第一、二部分相同,由于其内包含连接上下部分的孔洞,故需对孔洞边界加密以提高网格质量。由此,右键单击“第三部分自由四面体网格”,选择“分布”,在“边选择”中,选择孔洞的4个长边,将单元数设置为20;相同地,对孔洞的4个短边,将单元数设置为10。剖分网格如图3(c)所示。

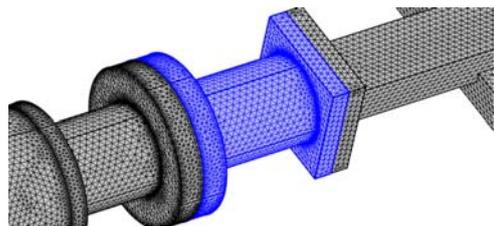
第四部分的最大尺寸亦为2 mm,由于其内包含很多肋片,故需对肋片边界加密。由此,右键单击“第四部分自由四面体网格”,选择“分布”,在“边选择”中,选择肋片边界,将单元数设置为20。剖分网格如图3(d)所示。

第五部分的网格剖分最重要,因为上下两部分的连接是矩形与曲面的接触,故连接处存在非常细小的“尖”,会大大降低该处及附近区域的网格质量。将第五部分的最大尺寸设置为0.75 mm;右键单击“第五部分自由四面体网格”,选择“分布”,在“边选择”中,选择内侧曲面的6条边,将单元数设置为20;对于图形中的其他短边,只能手动一一选中,将单元数设置为10。网格剖分如图3(e)所示。

所有FDTD选项都设置为默认值,网格剖分设置为ZMesher,单位设置为mm。在结构周围画出一个框,给出每个方向上单元距离为0.5 mm的网格条件。所有天线表面都设置为PEC(Perfect Electric Conductor),导线的半径为10 mm,电阻为50 Ω /m。矩形波导端口设置在矩形波导的开头,所有选项设置为默认值。



(a) grid of the first part



(b) grid of the second part

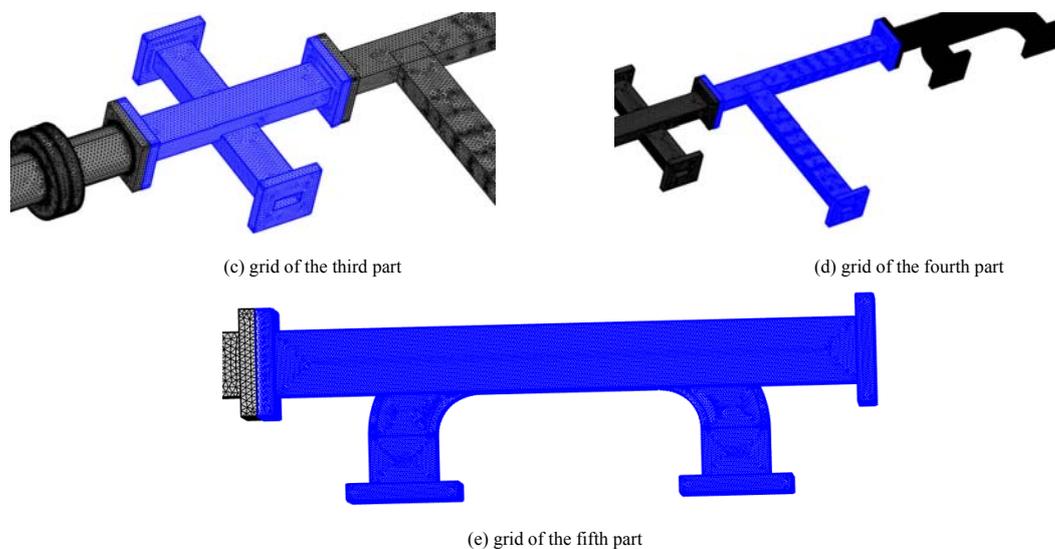


Fig.3 Grid model
图 3 网格模型

几何网格剖分：在所有的电磁条件都被定义之后，下一步生成由点、线和三角形组成的几何网格，这些网格充分再现了问题的几何结构。几何中包含许多曲面和几个直线曲面，只用 2 个三角形就足以模拟一个矩形平面表面；另一方面，需要许多三角形建模具有足够精确度的几何形状。

为满足这些要求，可以选择 Mesh Sizes by chordal error，并将最大 chordal error 设置为 0.005；可以使用更大的元平均值来生成网格，使用 50 的平均尺寸，得到包含大约 500 万个单元的网格，在天津超算中心的天河二号计算机中，获得几何网格大约需要 2 min，完成整个计算需 3 h 16 min。

5 仿真结果及其分析

模型空间由于采用无限元域截断，故网格数巨大，在 500 万单元左右，因此计算量巨大。图 4 给出了不同相对误差下天馈系统第五部分的结果，可以看出，在不同相对精确度下，结果相差无几。因此本文的计算设置相对精确度为 $R=10^{-4}$ ，以减少计算量，节约计算资源。背景场为 $f=1.35$ GHz， $E_b=3\ 360$ kV/m。



Fig.4 Comparison of different relative accuracies
图 4 不同相对精确度对比

5.1 电场强度

图 5 为半透明天线表面的电场强度分布，从中可看出，电场强度与材料有较大关系。材料为黄铜的部分场强明显高于材料为铝的部分。在横截面积出现变化，即拐角处，场强也略高于其他部分；在第五部分的曲面连接处(出现尖细表面)出现了极大值，这是因为网格剖分质量较差而产生了奇异值。

对每一部分单独分析，如图 6 所示。图 6(a)为第一部分和第二部分的场强分布。第一部分大部分区域的场强在 33 V/m 左右，在曲面连接处场强约为其他区域的 2 倍，即 60 V/m 左右，截面积变化越大，场强变化也越大。图 6(b)为第三部分的场强分布，从图中可以清晰看出，两部分上下连接孔周围的场强明显高于其他地方。图 6(c)中的内部肋片的场强亦大于其他部分，可推测出几何结构对场强的影响非常大。图 6(d)为天馈子系统第五部分的场强分布，由于这一部分的几何模型存在细小部分，故剖分出的网格质量较差，有几处出现了奇异值。第五部分大部分区域的场强明显高于前面 4 个区域，均在 90 V/m 左右，但弯曲通道处的场强明显较小；与第三部分不同的是，第五部分的 4 个通道并没有显著影响其周围的场强。

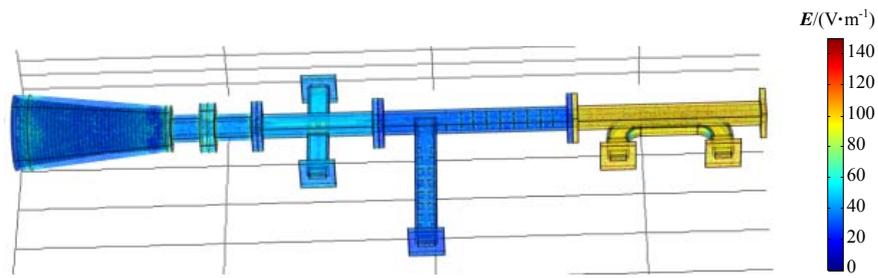
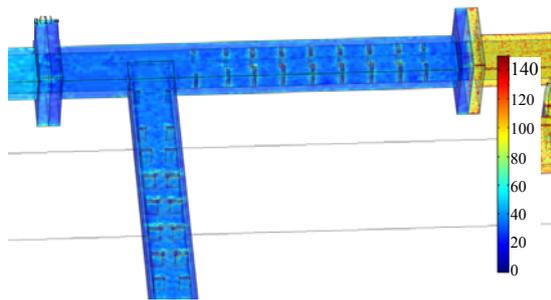
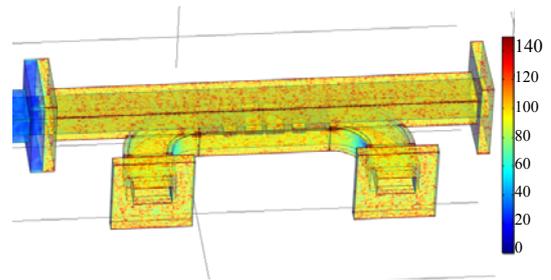


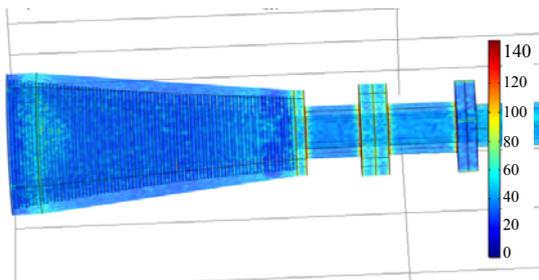
Fig.5 Distribution of electric field intensity in antenna feed system
图 5 天馈系统电场强度分布



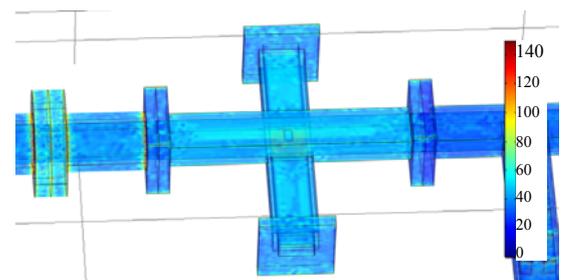
(a) electric field intensity distribution of first and second part of antenna feed subsystem



(b) electric field intensity distribution of third part of antenna feed subsystem

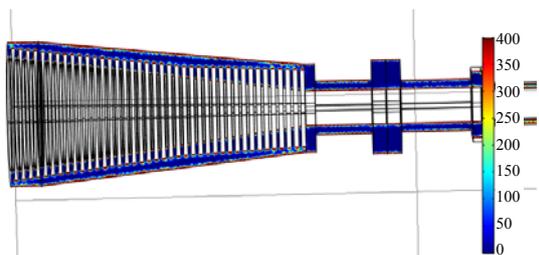


(c) electric field intensity distribution of fourth part of antenna feed subsystem

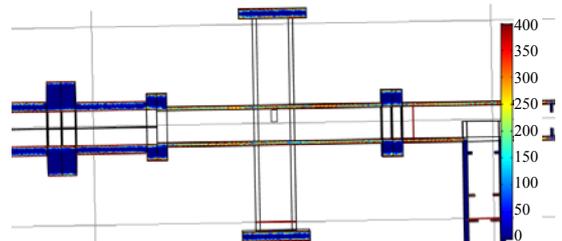


(d) electric field intensity distribution of fifth part of antenna feed subsystem

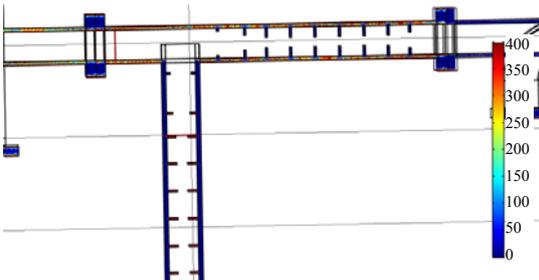
Fig.6 Electric field intensity distribution of each part of antenna feed subsystem
图 6 天馈子系统各部分场强分布



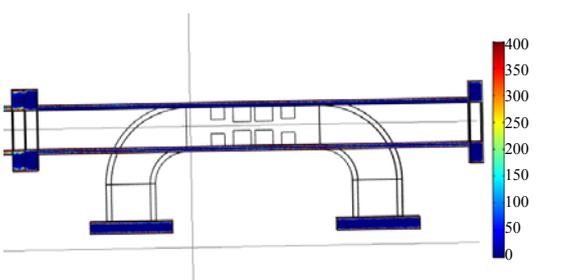
(a) current density distribution of first and second part antenna feed subsystem



(b) current density distribution of third part antenna feed subsystem



(c) current density distribution of fourth part antenna feed subsystem



(d) current density distribution of fifth part antenna feed subsystem

Fig.7 Current density distribution of antenna feed subsystem
图 7 天馈子系统感应电流密度分布

5.2 电流密度

图 7 给出了天馈子系统内部切面的感应电流密度分布。感应电流主要分布在天馈子系统固体的内外表面,其值一般在 650 A/mm^2 左右,而天馈子系统固体内部的感应电流小于 6 A/mm^2 。对于壁面较薄的区域,固体内部的感应电流亦较大。

6 结论

本文介绍了天馈子系统电磁耦合效应的仿真过程与结果。仿真结果表明,天馈子系统对于外界辐射电磁源的耦合电磁效应主要集中在固体部分的表面,从而引起信号的改变,对误码率的作用较大。文中的结果表明能够对波导天线进行仿真,并且不考虑与任何类型的实验数据进行比较,因为它们需要更多的处理和谨慎地选择不同的条件。

参考文献:

- [1] 乔登江. 高功率电磁脉冲、强电磁效应、电磁兼容、电磁易损性及评估概论[J]. 现代应用物理, 2013,4(3):219-223. (QIAO Dengjiang. Introduction to HPEMP, IEME, EMC and EM susceptibility and its assessment[J]. Modern Applied Physics, 2013,4(3):219-223.)
- [2] 王鹏,李万玉. 高功率电磁效应及防护技术研究概述[J]. 火控雷达技术, 2012,41(1):81-83. (WANG Peng, LI Wanyu. Summary of research on high power electromagnetic effect and protection technology[J]. Fire Control Radar Technology, 2012,41(1):81-83.)
- [3] HU Rui, WEN Yinghong, CAO Hefei, et al. Radiation simulation on satellite navigation antenna by strong electromagnetic pulse[C]// 2017 7th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE). Xi'an, China: [s.n.], 2017:216-219.
- [4] LOZANO L, ALGAR M J, GONZALEZ I, et al. Electromagnetic simulations for aeronautical satellite communications channel model[C]// 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). 2012:3145-3148.
- [5] LUAN Shenshen, WEI Yan. A joint method of EMT and DEMATEL in analyzing HEMP coupling effect of phased array radar antenna system[C]// 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2018:369-372.
- [6] 左超,王好清,张妍,等. 系统抗同频干扰的电磁仿真研究[J]. 电子测量技术, 2014,37(4):5-8. (ZUO Chao, WANG Haoqing, ZHANG Yan, et al. Electromagnetic simulation research on same frequency interference rejection techniques[J]. Electronic Measurement Technology, 2014,37(4):5-8.)
- [7] 向振宇,谭志良. 天线耦合干扰对系统电磁效应的电磁拓扑分析[J]. 装备环境工程, 2010,7(5):111-114. (XIANG Zhenyu, TAN Zhiliang. Topological analysis on electromagnetic model of electronic system under interference coupled from antenna[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010,7(5):111-114.)
- [8] PARMANTIER J P, JUNQUA I, BERTUOL S, et al. Effects of distributed sources on transmission line model: low frequency approximations[J]. Interaction Notes, 2016(628):1-26.
- [9] 季涛,罗建书. 电磁耦合实验平台系统线缆束的电磁拓扑分析[J]. 强激光与粒子束, 2014,26(2):215-218. (JI Tao, LUO Jianshu. Electromagnetic topology analysis of cable bundle of electromagnetic coupling experimental platform system[J]. High Power Laser and Particle Beam, 2014,26(2):215-218.)
- [10] DIOMANDE K, BRAUT J L, GUENA A, et al. BCI modeling at high frequency: [10 kHz-400 MHz] determinist and statistical methods[Z]. EuroEM2012 Book of Abstracts, 2012:169.
- [11] LI Ying, LUO Jianshu, NI Guyan. The terminal responses of the two-wire line in multi-aperture cavities based on electromagnetic topology and method of moments[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2011. DOI:10.1155/2011/349361.
- [12] ZHANG Xufeng, LUO Jianshu, ZHAO Zipeng. The iterative solution for electromagnetic field coupling to buried wires[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2011. DOI:10.1155/2011/165032.
- [13] TONG Zongliang, SUN Lei, LI Ying, et al. Multiresolution time-domain scheme for terminal response of two-conductor transmission lines[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016(12):1-15.
- [14] ZHANG X F, LUO J S, LI Y. Transient semianalytic analysis of a lossless multiconductor transmission line with nonlinear loads excited by a plane wave[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2013,80(1):165-172.
- [15] TONG Zongliang, SUN Lei, LI Ying, et al. Multiresolution time-domain analysis of multiconductor transmission lines terminated in linear loads[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017(10):1-15.