文章编号: 2095-4980(2018)05-0892-05

HFSS 软件边界条件和网格剖分技术适用领域

周文颖

(兰州交通大学 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘 要:为了研究以天线作为射频辐射源的生物电磁学问题,运用基于有限元法的三维高频 结构仿真软件(HFSS)仿真手机天线对人头组织辐射模型和地铁司机职业电磁暴露模型,分析电小尺 寸模型和电大尺寸模型中辐射边界条件和完美匹配层的设置对仿真结果的影响。通过对比已有文 献中时域有限差分法对该模型的仿真结果,验证采用厚度为 λ/2 的完美匹配层作为边界条件的可靠 性;结合仿真结果的精确度、网格剖分数和计算速度,说明天线近场辐射问题中电小尺寸模型应 该选择二阶基函数进行网格剖分,电大尺寸模型应该选择混合阶基函数。

关键词: 有限元法; 三维高频结构仿真软件; 辐射边界条件; 完美匹配层; 二阶基函数 中图分类号:TN820 **文献标志码**:A **doi**:10.11805/TKYDA201805.0892

Application of HFSS software in boundary conditions and meshing technology

ZHOU Wenying

(Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control for Ministry of Education, Lanzhou Jiao Tong University, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: Aiming at studying the bioelectromagnetism problem of using antenna as a radio frequency radiation source, by using 3-dimensional electromagnetic simulation software(High Frequency Structure Simulator, HFSS) based on Finite Element Method(FEM), the model of influence on human head exposuring to the radiation caused by the mobile antenna, and cab's driver occupational electromagnetic exposure model of subway are simulated. The influence of the settings of radiation boundary condition and Perfect Matching Layers(PML) on the accuracy of the simulation results in electric small size model and electric large size model is analyzed. Comparing with existed literature's simulation results of time domain finite difference method, the reliability of perfect matching layers with thickness of $\lambda/2$ as the boundary condition is verified. Combining the accuracy of the simulation results, the number of grid segmentation and the speed of calculation, it is indicated that the antenna near-field radiation problem of electric small size model should choose the second-order basis function for grid mesh, and electric large size model should choose the mixed basis function for grid mesh.

Keywords: finite element method; 3-dimensional High Frequency Structure Simulator; Radiation boundary condition; Perfect Matching Layers; second-order basis function

基于有限元法(FEM)的三维高频结构仿真软件(HFSS),目前被广泛用于射频微波元件和天线设计领域^[1-2], 传统的天线设计都是基于辐射边界条件的,随着射频电磁辐射对生物组织影响的研究日益增加,HFSS软件也被 逐步应用于生物电磁学的模拟仿真,特别是以天线作为射频辐射源对人体组织的辐射模型^[3]。比如评估轨道交通 工具中司乘人员电磁暴露安全^[4-7]这样的电大尺寸模型中,边界条件和阶函数的选取也需要重新进行考量。由于 量化人体组织对辐射的吸收程度和具体分布情况,主要通过电磁剂量学方法进行模拟仿真^[8]。因此,明确 HFSS 软件的边界条件和阶函数的适用范围,进一步优化仿真人体组织对射频电磁辐射的吸收精确度是一项具有现实意 义的剂量学课题。 本文运用 HFSS 软件 15.0 版本分别模拟以手机天线对人头的辐射影响的电小尺寸模型和以地铁司机职业电 磁暴露为代表的电大尺寸模型,对比已有文献中对同一模型的仿真结果,验证 HFSS 软件仿真天线近场辐射生物 体组织的可靠性。在此基础上,进一步讨论边界条件的设置和不同阶数基函数的选择对仿真结果的影响,为 HFSS 软件应用于大规模无线通信天线或天线阵列对人体组织辐射影响的远场问题研究^[9]奠定基础,以便更好地用该软 件来解决复杂电磁环境中的生物电磁学问题。

1 理论基础

1.1 HFSS 软件中的边界条件

对于电磁场的开放问题,有限元法必须利用吸收边界条件截断计算空间,才能将无线大空间的计算问题限制 在有限空间区域内,HFSS软件中模拟以天线为高频辐射源时,主要使用的2种边界条件:

1) 辐射边界条件

HFSS 软件定义 Radiation 边界条件为吸收边界条件(Absorbing Boundary Condition, ABC),系统在辐射边界 吸收电磁波,实现对自由空间的等效。在辐射边界表面,二阶辐射边界条件的表达式为:

$$(\nabla \times \boldsymbol{E})_{\text{tan}} = jk_0 \boldsymbol{E}_{\text{tan}} - \frac{j}{k_0} \nabla \times (\nabla \times \boldsymbol{E}_{\text{tan}}) + \frac{j}{k_0} \nabla \times (\nabla \cdot \boldsymbol{E}_{\text{tan}})$$
(1)

式中: *E*_{tan} 为边界面电场的切向分量; *k*₀ 是自由空间相位常数。这种近似的准确值取决于辐射源与边界之间的距离。 2) 完美匹配层

JPBerenger于 1994 年首次提出基于场分裂形式的完美匹配层(PML)技术^[10], WCChew和RMittra等学者 对 PML 边界条件作了更深入的研究,使 PML 可直接用于频域有限元法,只需将 PML 等效为一般形式的麦克斯 韦旋度方程: $iw\varepsilon E = \nabla \times H$,即:

$$\begin{cases} iw\varepsilon E_{x} = \frac{1}{s_{y}} \frac{\partial}{\partial y} H_{z} - \frac{1}{s_{z}} \frac{\partial}{\partial z} H_{z} \\ iw\varepsilon E_{y} = \frac{1}{s_{z}} \frac{\partial}{\partial z} H_{z} - \frac{1}{s_{x}} \frac{\partial}{\partial x} H_{z} \\ iw\varepsilon E_{z} = \frac{1}{s_{x}} \frac{\partial}{\partial x} H_{z} - \frac{1}{s_{y}} \frac{\partial}{\partial y} H_{z} \end{cases}$$

$$(2)$$

当满足条件 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2, \mu_1 = \mu_2, s_{1x} = s_{2x}, s_{1y} = s_{2y}$ 时,对任意的 s_z 区域都是匹配的,且与入射角和频率无关^[11]。应用 厚度为 d 的 PML 作为截断边界引起的反射大小可用反射系数的模表示为: $|R(\theta)| = \exp(-2\beta k_0 d \cos \theta)$ 。该公式表明:当 d 足够大时,电磁波在介质中迅速衰减至很小,从而可以有效吸收电磁波。

1.2 HFSS 软件中的网格剖分方法

以四面体顶点作为结点未知量的有限元法,在解决时谐电 磁场问题时会出现伪解、缺乏求解区域内不同媒质的连续性条 件、边界面不连续和尖端长的奇异性问题。为了克服上述问题, HFSS 软件采用以四面体棱边元作为结点未知量的矢量有限元 法,提供了 4 种不同阶数的棱边元基函数进行模型剖分,分别 为零阶(zero order)、一阶(first order)、二阶(second order)、混合 阶(mixed order)4 种基函数。高阶插值函数^[12]的应用可以提高精 确度,在不增加计算复杂度的前提下加快收敛速度,以保证自 适应网格划分的准确性和连续性。



Fig.1 Model of head radiated by mobile phone monopole antenna(electrically small size model)图 1 手机单极子天线辐射人头模型(电小尺寸模型)

2 不同边界条件和奇函数选择对数值模拟结果的影响

电磁剂量学方法中的时域有限差分法(Finite Different Time Domain, FDTD)是最早被用于研究手机或手持台 天线的近场问题的计算电磁学方法^[13]。文献中运用 FDTD 模拟 915 MHz 天线对三层球人头(包括头皮、颅骨和大脑)的辐射。手机的长宽高分别为 30 mm、60 mm 和 150 mm,单极子天线高度为 85 mm,位于手机顶面的中心位 置。馈源位于天线与手机之间,距人头外径 15 mm,天线的输入功率为 1 W,如图 1 所示。图中手机天线的工作 频率为 915 MHz, 波长为 328 mm, 头模型半径为 100 mm, 小于 1/3 波长,属于电小尺寸模型。

人头模型由头皮、颅骨和大脑 3 种组织构成, 915 MHz 频 率对应的不同组织介电参数和几何尺寸如表 1 所示。按照表 1 列出的头模型组织介电参数,在 HFSS 软件中对头模型进行材料 赋值。

表	1915 MHz 人体模型的介电参数和几何尺寸
Table1	Dielectric parameters and geometric dimensions
	of a 915 MHz human body model

	scalp	skull	brain						
relative permittivity	35	8	43						
conductivity/ $(S \cdot m^{-1})$	0.60	0.11	0.80						
thickness/mm	5	5	90						
tissue density/(kg·m ⁻³)	1 100	1 850	1 030						

2.1 不同边界条件对数值模拟结果的影响

为了对比 FDTD 的仿真结果,验证 HFSS 软件数值模拟结果的准确性,在 HFSS 中建立上述手机天线辐射人 头的模型,迭代精确度设置为 0.02,边界条件设置为 Radiation 边界条件。由于人体组织内形成的辐射吸收剂量 主要由比吸收率(Specific Absorption Rate, SAR)^[14]来衡量,SAR_{peak}的仿真结果如图 2 所示。图 2 表明,头模型 SAR 的最大峰值为 8.265 4 W/kg,峰值集中在离天线馈源最近的头皮组织内。SAR 的最大峰值与文献值相比较,误差仅为 0.8%,远小于允许误差(5%),说明 HFSS 软件计算的可靠性。

上述模型是天线近场区域内人体组织高频电磁暴露的情况,为了进一步说明在电大尺寸模型中,PML 层对 仿真结果的影响,构建基于 TETRA 系统手持设备为高频电磁辐射源的地铁司机职业电磁暴露模型。其中地铁司 机使用的 TETRA 系统手持设备的频率和结构与单极子天线手机模型类似,可等效为地铁司机室中的等效辐射源, 司机的人头与手机辐射模型及辐射距离与图 1 模型完全相同。具体模型如图 3 所示。



图 3 地铁司机职业电磁暴露模型(电大尺寸模型)

已有的 HFSS 软件应用研究中大多使用 Radiation 边界条件,并未明确 Radiation 和 PML 边界条件的适用范围,以及 PML 层厚度对计算精确度的影响。因此,分别在图 1 所示电小尺寸模型和图 3 所示的电大尺寸模型中, 调整设置边界条件为 PML 层,厚度分别为 10 mm(λ/32),20 mm(λ/16),40 mm(λ/8),80 mm(λ/4),160 mm(λ/2), 246 mm(3λ/4),328 mm(λ),其计算结果与文献值的对比如表 2~表 3 所示。其中 SAR_{10g}值是通过 SAR 最大值直接 计算所得,因此,以 SAR 的最大峰值做为对比标准。

表 3 说明,电大尺寸模型中不同的 PML 层厚度对模拟结果产生的影响大于手机人头模型,但 2 种不同尺寸 模型中,当 PML 层厚度为 λ/2 时, SAR 最大峰值的模拟结果与文献值的模拟值结果最为接近。电大尺寸模型中 SAR_{peak}值取司机人头模型中 SAR 的最大值。

表 2 电小尺寸模型中不同厚度 PML 层仿真结果与文献值仿真结果的对比											
Table2 Comparison of results of PML layer with different thicknesses in electric small size model and the simulation results of literature											
PML thickness/mm	10	20	40	80	160	246	328	literature			
SAR _{peak} /(W/kg)	8.269 6	8.352 7	8.249 4	8.278 0	8.251 2	8.288 1	8.255 1	8.200 0			
SAR10 g/(W/kg)	4.145 5	4.127 8	4.100 1	4.153 8	4.137 1	4.121 7	4.157 6	4.300 0			
表 3 电大尺寸模型中不同厚度 PML 层仿真结果与 Radiation 边界条件下仿真结果对比											
Table3 Comparison of simulation results of PML layers with different thicknesses in electric large size model and Radiation boundary conditions											
PML thickness/mm	10	20	40	80	160	246	328	Radiation			
SAR _{peak} /(W/kg)	8.929 0	8.956 9	8.963 8	8.940 1	8.801 7	8.959 8	8.927 9	8.981 5			
SAR _{10 g} /(W/kg)	4.696 7	4.739 6	4.746 3	4.759 1	4.637 9	4.710 5	4.692 2	4.863 8			

对比不同尺寸模型中 Radiation 边界条件和 PML 边界 条件的数值模拟结果,表面上 Radiation 边界条件与 PML 边界条件的仿真结果相差不大,但在电大尺寸模型中,尤 其是解决复杂高频电磁环境中的电磁暴露问题时,考虑对 异性材料边界上入射电磁波的完全吸收能力,应选择 PML 作为边界条件,使仿真结果更为精确。

2.2 不同阶的基函数选择对数值模拟结果的影响

HFSS 软件利用数值解法求解微波问题,在电磁场解每 一个离散单元中基函数近似表示为插值函数,选用基函数 的阶数越高,每个单元中的近似解精确度越高,但对应更 多的未知数。同一模型选用零阶基函数时,网格数为5900, 未知量为6000;选用一阶基函数时,网格数为3600,未 知量为21000;选用二阶基函数时,网格数为1700,未 知量为29000^[15]。

本文模型的边界条件设置为 PML 层,厚度为 160 mm, 分别选用 zero,first,second 和 mixed 4 种不同的基函数对天 线近场模型和地铁电大尺寸模型进行运算,为了对比不同 设置条件下的计算复杂度,用 SAR_{peak},SAR_{10g}的模拟结果、 运算时间的长短和网格剖分的数量进行衡量,仿真结果如 图 4~图 6 所示。其中图 4 和图 5 的纵坐标表示运算时间(以 min 为单位)、SAR_{peak}和 SAR_{10g}对应的具体数值,图 6 的 纵坐标表示剖分的网格数。

由图 4~图 6 可知,选用零阶基函数剖分的网格数最 多,也是计算所用时间最长的插值函数;选用一阶函数的 求解精确度相对较低,网格剖分数仅次于零阶基函数;选 用二阶基函数达到相同求解精确度需要的剖分单元更少, 形成的矩阵方程中系数矩阵的规模更小,计算效率相对较 高;混合阶基函数是按照几何模型的复杂程度,自动在不 同区域采用不同阶数的基函数,适用于模型不同区域尺寸 差距较大的模型。所以电大尺寸模型选用混合阶基函数获 得相同求解精确度的网格剖分数最少,但因为剖分算法相 对复杂,计算时间比二阶基函数稍长。

综上所示,不同阶函数的选取对 SAR 的仿真结果、 计算时间和网格剖分数会产生不同的影响,体现了阶函数 不同的求解精确度。天线近场辐射问题中,对以手机人头 模型为代表的电小尺寸模型,选择二阶基函数的方案最 优;对以地铁司机职业电磁暴露模型为代表的电大尺寸模 型,选择混合阶基函数的方案最优。



Fig.6 Influence of different order difference function settings on the meshing of two kinds of models

图 6 不同阶数的插值函数设置对两种模型网格剖分的影响

3 结论

以手机天线辐射人头模型和地铁司机职业电磁暴露模型为例,研究了天线近场辐射问题中 HFSS 软件仿真电 小尺寸模型和电大尺寸模型时,不同边界条件设置对仿真结果的影响,验证了厚度为 λ/2 的 PML 作为辐射边界 条件的精确度和可靠性;并从仿真结果精确度、网格剖分数和计算时间三方面,讨论了不同阶数的基函数的适用 领域,说明天线近场辐射问题中电小尺寸模型应该选择二阶基函数进行网格剖分,电大尺寸模型应该选择混合阶 基函数,以保证仿真结果的准确性和稳定性,为进一步解决复杂电磁环境中天线远场辐射的生物电磁学问题奠定 基础。如何解决天线远场辐射中电大尺寸模型边界条件和网格剖分的问题是下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] 李业振,梁仙灵,金荣洪,等.集群通信与无线局域网多天线共口径设计[J]. 电波科学学报, 2016,31(5):211-218. (LI Yezhen,LIANG Xianling,JIN Ronghong, et al. Design of trunked communication and WLAN multiple antenna used shareaperture technology[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2016,31(5):211-218.)
- [2] 孙元,胡欣,廖鹏,等. 24 GHz 微带阵列天线设计与实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(4):640-645.
 (SUN Yuan,HU Xin,LIAO Peng,et al. Design and implementation of 24 GHz microstrip antenna array[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(4):640-645.)
- [3] PAULIDES M M,MESTROM R,SALIM G. A printed Yagi-Uda antenna for application in magnetic resonance thermometry guided microwave hyperthermia applicators[J]. Physics in Medicine & Biology, 2017,2(5):1831-1847.
- [4] KARIL R,AMMOR H,TERHZAZ J. Dosimetry in the human head for two types of mobile phone antennas at GSM frequencies[J]. Central European Journal of Engineering, 2014,4(1):39-46.
- [5] 于文婷. 人体在电动汽车电磁环境中的人身安全性研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012. (YU Wenting. Research on the personal safety in the automotive electromagnetic environment[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.)
- [6] 周文颖,逯迈. 地铁司机室双八木天线射频电磁场暴露的健康风险评估[J]. 高电压技术, 2016,42(8):2549-2557.
 (ZHOU Wenying,LU Mai. Risk assessment of the radio frequency electromagnetic field generated by cab's double yagi-uda antenna[J]. High Voltage Engineering, 2016,42(8):2549-2557.)
- [7] 牛大鹏,朱峰,邱日强,等. 高铁离线电弧射频内和车内低频电磁暴露的特性研究[J]. 高电压技术, 2016,42(8):
 2587-2595. (NIU Dapeng,ZHU Feng,QIU Riqiang, et al. Study on the characteristics of off-line arc's radio-frequency and low-frequency electromagnetic exposure inside the high speed rail train[J]. High Voltage Engineering, 2016,42(8): 2587-2595.)
- [8] LU M,UENO S. Comparison specific absorption rate induced in brain tissue of a child and an adult mobile phone[J]. Journal of Applied Physics, 2012,111(7):07B311-07B311-3.
- [9] VASSILEV A, FERBER A, WEHRMANN C, et al. Magnetic field exposure assessment in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015,57(1):35-43.
- [10] BERENGER J P. A perfect matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. Journal of Computational Physics, 1994,114(9):185-200.
- [11] 韩宇南. 计算电磁学和并行算法解决生物电磁学关键技术的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2007. (HAN Yunan. A study on key technologies in bioelectromagnetics using computational electromagnetic and parallel computing[D]. Beijing: Beijing University of Post and Communication, 2007.)
- [12] 王长清.现代计算电磁学[M].北京:北京大学出社, 2005:304-306. (WANG Changqing. Modern computational electromagnetics[M]. Beijing:Peking University Press, 2005:304-306.)
- [13] OKONIEWSKI M,MARIA A. A study of handset antenna and human body interaction[J]. Central European Journal of Engineering, 1996,44(10):1855-1864.
- [14] RAMA R T. Estimation of specific absorption rate using infrared thermography for the biocompatibility of wearable wireless device[J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2017,56(8):101-109.
- [15] 谢拥军,刘莹,李磊,等. HFSS 原理与工程应用[M]. 北京:科学出版社, 2009:125-126. (XIE Yongjun,LIU Ying,LI Lei,et al. HFSS principles and engineering applications[M]. Beijing:Science Press, 2009:125-126.)

作者简介:



周文颖(1984-),女,湖南省邵阳市人,在读博士研究生,讲师,主要研究方向为轨道交通信息控制 和生物电磁学.email:zhouwy29@126.com.