

全波电磁仿真软件在《微波工程》 教学中的应用

包 扬, 樊纪元, 何 欣, 汪书嘉

南京邮电大学, 电子与光学工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2022年1月10日; 录用日期: 2022年1月22日; 发布日期: 2022年1月29日

摘 要

在微波工程的教学中, 往往会遇到课程理论性强、计算公式繁多所导致的理论和实际的微波器件设计无法联系起来的问题。针对这一问题, 本文创新性地应用全波电磁仿真软件设计出适合该课程的实践教学环节: 在课程中借助计算机辅助教学的方法, 使用仿真软件进行微波器件的设计与仿真, 实时获得各类参数, 通过加工测试, 验证仿真设计的正确性, 最终辅助了课程教学。该教学改革方法提升了学生对微波器件的实际设计能力, 改善了传统教学法所遇到的问题。结果表明, 通过全波电磁仿真软件的应用, 该课程的平均分相较往年有较大提升, 取得了不错的教改效果。

关键词

教学改革, 电磁仿真, HFSS

The Application of Full Wave Electromagnetic Simulation Software in Teaching of Microwave Engineering

Yang Bao, Jiyuan Fan, Xin He, Shujia Wang

College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu

Received: Jan. 10th, 2022; accepted: Jan. 22nd, 2022; published: Jan. 29th, 2022

Abstract

In the teaching of microwave engineering, the theory is hard to be understood by students because of the requirement of math. The theory and the practical design of microwave components are not

easy to be connected. In this paper, the full wave electromagnetic simulation software is aided to design the practical teaching innovatively. The computer aided teaching is applied to microwave engineering. The simulation software is applied to achieve the real-time parameters to demonstrate the accuracy of the simulation through the fabrication and testing of the microwave components, which results in assisting the teaching process. With the proposed educational reform method, the ability of designing practical microwave component for students is improved and the issues in the traditional teaching method are overcome. The results show that enhancement is achieved for the average grades of the students with the application of the full wave electromagnetic simulation software.

Keywords

Educational Reform, Electromagnetic Simulation, HFSS

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着微波工程在雷达、通信、遥感等应用领域的不断发展,《微波工程》课程在高等院校电子信息类学科发展和学生培养的重要性方面日趋显现出来。该课程是电磁场与无线技术本科生的专业基础课,内容包括了经典的电磁场理论,微波电路、器件和系统的分析、设计和测量[1]。旨在培养学生掌握利用“路”和“场”相结合的方法研究常见微波系统的特性,掌握微波网络的基本概念和性质,掌握常见微波无源器件的功能特点、应用场合和物理结构,培养学生类比、综合、归纳和演绎、等效等科学思维的能力,形成场路结合的分析理论思维能力,并能够独立分析和设计常见的微波无源器件。该课程的学习,使得学生在毕业后能够运用微波工程中的科学原理,借助文献研究分析来解决电磁场与无线技术领域的复杂工程问题。

然而在《微波工程》的教学中遇到了一些问题:首先,其先修课程为《大学物理》《高等数学》和《电磁场理论》,这些课程的特点是概念抽象、公式繁多、理论深奥、对数学功底的要求极高,如微分、积分、矩阵论等[2] [3]。学生往往在先修课程的学习中没有打下坚实的数理基础,采用传统的教学方法会造成学生不易理解和掌握知识点,导致学生在学习过程中举步维艰;其次,该课程与实际电路和器件设计结合的非常紧密,通过传统的教学方法,在完成课程的学习后,学生仍然很难具备实际的微波无源器件的设计能力,仍然对实际微波器件的加工、测试环节非常陌生。

随着计算机辅助教学设计方法的兴起,给《微波工程》课程的教学带来新的契机[4] [5]。借助于先进高效的电磁仿真软件,学生在计算机的辅助下弥补数理基础的不足,完成微波无源器件的仿真设计。此外,通过调试、优化的方式改善所设计器件的性能,学生借助电磁仿真软件实时地获取性能指标,这样可以满足实际应用中的设计需求,通过加工测试的方式验证仿真设计的正确性。全波电磁仿真软件在《微波工程》中的应用,使得学生可以直观地感受到电磁仿真软件功能的强大,并且积累微波无源器件实际的设计经验与技巧,方便学生在毕业之后具备从事相关工作的能力。

2. 全波电磁仿真软件仿真教学

高频仿真软件(High Frequency Simulation Software, HFSS)是由美国 ANSYS 公司开发的一款基于有限

元法(Finite Element Method, FEM)的三维电磁场全波商用仿真软件[6]。FEM 是一种求解工程和数学建模中微分方程组的数值方法[7] [8] [9] [10]。最初起源于土木工程和航空工程中, 1960 年后开始应用于求解电磁场问题, FEM 利用网格离散化将一个连续区域转化为一组离散的子区域或称为元, 对每一个元假定一个合适的近似解, 通过匹配边界条件的方式, 求得问题的解, FEM 求解精度高, 速度快, 并且最关键的是可以适应各种形状目标的求解, 非常方便的用于求解电大尺寸电磁场问题[11] [12] [13] [14]。HFSS 功能强大, 用户界面友好, 能够精确快速地计算微波器件的电磁特性, 如 S 参数、增益、方向图等, 帮助设计者高效地设计各种微波器件, 如射频与微波器件、天线、天线阵、天线罩等, 用于研究目标和系统的电磁兼容和电磁干扰特性, 可以广泛地应用于电子、通信、航空、航天、半导体、计算机、网络、传播等多个领域[15]。故本文选择使用 HFSS 作为全波电磁仿真软件。

接下来以带阻和带通滤波器的设计为教学典型案例展示一下如何用 HFSS 对其进行电磁全波仿真。带阻滤波器是指能通过大多数频率分量、但将某些范围的频率分量衰减到极低水平的滤波器, 起到抑制不需要的噪声干扰的作用, 一般应用于无线通信系统中抑制高功率发射机、非线性功放的杂散频谱以及带通滤波器的寄生通带等[1]。带阻滤波器的技术指标一般包括工作频率、输入输出间的插入损耗、输入输出间的回波损耗、阻带带宽、每个端口的电压驻波比等。而带通滤波器则相反, 是指在某些频带内能通过大多数的频率分量。可以说带阻和带通滤波器影响了微波电路的整体性能。

工作频率就是滤波器滤除的特定频段。插入损耗是由于传输线的介质或导体不理想产生的。回波损耗是表示信号反射性能的参数, 即反射波和入射波的功率之比, 说明部分入射功率反射到信号源。阻带带宽指的是阻带上阻带频率与下阻带频率之差, 信号在该频率带宽中会极大衰减。电压驻波比与 S 参数直接相关, S 参数从功率的角度表达电路的输入和输出, 可以度量阻抗 50 欧姆传输线的传输和反射功率, S11 和 S22 分别为输入反射系数和输出反射系数, 而 S21 和 S12 分别为正向和反向传输系数。S11 描述了回波损耗而 S21 描述了插入损耗。一般 S 参数用 dB 为单位。这些技术指标可以用 HFSS 软件仿真时很方便的实时地获得, 而传统教学法中只能通过具体理论公式去一个个计算, 非常影响授课效率和效果。除此之外, 在传统教学法中, 就算通过理论公式计算得出了性能指标后, 也没法方便地通过画扫频图等方式直观的向学生展示, 这些都体现了计算机辅助教学方法的先进性。

3. 带阻滤波器的 HFSS 仿真

首先讨论带阻滤波器的 HFSS 仿真, 目标为设计一个平面带阻滤波器, 性能指标为阻带中心频率为 4 GHz, 阻带带宽为 200 MHz, 带内插损大于 15 dB。指导学生建立 HFSS 仿真文件: 首先, 在工具栏选择绘制盒子来绘制介质基板, 在介质基板材料中选择 FR4-epoxy 材料(相对介电常数为 4.4, 相对磁导率为 1), 设置介质基板的长度、宽度以及相对位置坐标。使用 Select Faces 选出介质基板的底面, 通过 Assign Boundary 设置介质基板底面为理想电导体 PEC (Perfect Electric Conductor), 通过绘制矩形的组合在介质基板上搭建滤波器并且将滤波器的输入和输出端通过 Assign Boundary 设置为 PEC; 然后, 在介质基板两立侧面绘制两块馈电口, 选择 Assign Excitation 设置端口为集总端口模式, 绘制端口激励积分线为自矩形端口上边界指向下边界的直线箭头。设置端口阻抗不为固定值, 从而更加真实地测量滤波器参数; 最后, 绘制空气盒子 Air Box 距离实物地边界距离为四分之一个工作波长, 这里工作频率为 4 GHz, 因此经计算距离为 18.75 mm, 设计完成如图 1 所示。

为了运行仿真求解, 需要选择 Analysis, 添加一个新的求解 Add Solution Setup, 设置求解频率为工作中心频率 4 GHz, 采用默认的 6 次最大迭代次数, 两次最大迭代误差为 0.02。添加新的扫频 Add Frequency Sweep, 并以 4 GHz 为中心设置上限扫频范围分别为 3 GHz 和 6 GHz, 扫频步长为 0.04 GHz。添加新的模型求解数据报告 Create Modal Solution Data Report, 也就是画出最终所需要的 S 参数曲线图,

Modify Report 选择 S 参数中的 S_{11} 和 S_{21} 以 dB 作为单位进行绘制曲线图。在进行整体的正确性和完整性自检验证通过后, 就可以进行仿真分析。

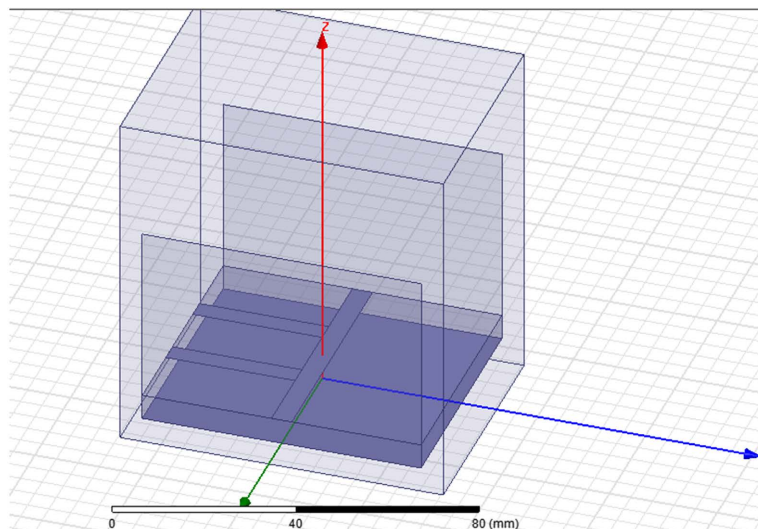


Figure 1. Design picture of band elimination filter
图 1. 带阻滤波器的 HFSS 设计图

经过优化分析后, 得出的 S 参数曲线如图 2 所示。从仿真曲线图中可以发现, HFSS 仿真设计结果与目标一致, 该带阻滤波器的性能基本达到了预期指标。其工作中心频率约为 4 GHz, S_{11} 和 S_{21} 分别为 -2.05 dB 和 -21.6 dB, 阻带带宽较宽, 达到了 0.2 GHz, 这是由滤波器的结构、工作频率以及材质共同导致的。通过实物加工的方式, 见图 3, 与电磁仿真软件仿真的结果进行比较, 测试结果证明加工后的器件和设计的结果相符, 从而证明了软件仿真的正确性。可见用 HFSS 仿真软件可以准确、快速地设计带阻滤波器, 通过让学生动手设计仿真, 巩固了带阻滤波器的理论, 加强了仿真设计流程的理解, 辅助了老师对该知识框架结构的的教学。通过期末试卷分析, 该课题组成员在带阻滤波器等相关知识点的期末考试中失分较少, 从而说明了使用电磁仿真软件进行带阻滤波器的设计提升了学生对该知识点的理解与掌握。

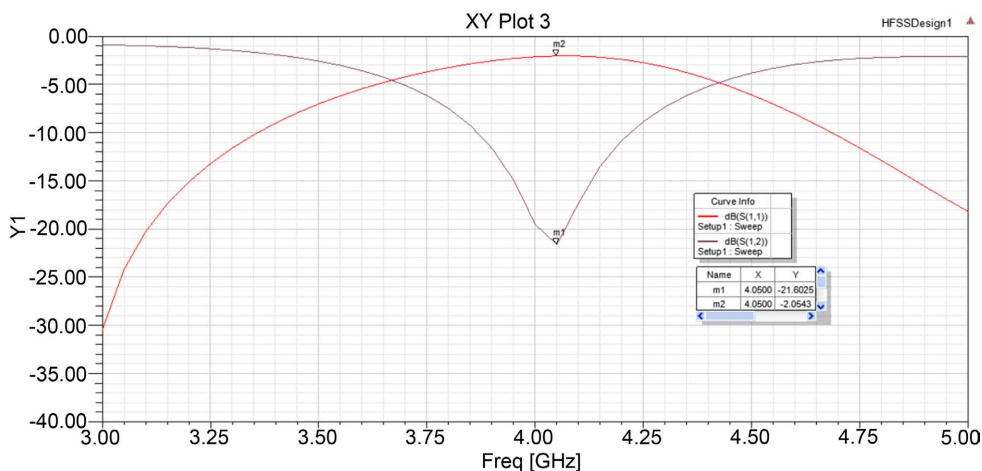


Figure 2. S parameters of band elimination filter
图 2. 带阻滤波器的 S 参数

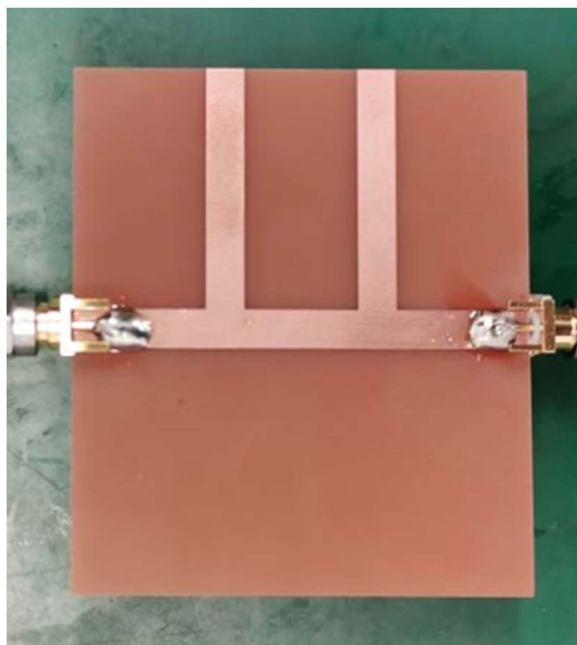


Figure 3. Fabrication of band elimination filter
图 3. 带阻滤波器的加工实物

4. 带通滤波器的 HFSS 仿真

接下来讨论带通滤波器的 HFSS 仿真。课程目标要求带通滤波器的中心频率为 3.9 GHz，带通宽度为 200 MHz，带内插损小于 1 dB 并且带内回波损耗小于 15 dB。使用耦合微带线滤波器进行带通滤波器的设计。由平行的耦合线节相连组成谐振电路，平行耦合微带传输线由两个平行微带线紧靠在一起，两个传输线之间会有功率耦合使得射频信号通过并且阻断低频信号，可以很好的构成带通滤波器的单元。通过多个带通滤波器的级联的形式解决单个单元无法提供良好的频率特性的问题。指导学生建立 HFSS 仿真文件，在工具栏选择绘制盒子来绘制介质基板，在介质基板材料中选择 FR4-epoxy 材料，Select Faces 设置介质基板的长度、宽度以及相对位置坐标。选出介质基板的底面并设置介质基板底面为理想电导体 PEC (Assign Boundary 设置为 PEC)，在介质基板两立侧面绘制两块矩形，上下边界分别与滤波器输入/输出端口和金属地面相交。由于波端口只能用于模型表面而对于处于模型内部的端口激励 Assign Excitation 只能选择集总端口激励，因此将馈电接口激励设置为集总端口。添加空气盒子 Air Box，保证空气盒子边界距离实物的边界距离为四分之一工作波长，最终得出带通滤波器的设计图如图 4 所示。

在求解时选择 Analysis，设置求解频率为 3.9 GHz，最大迭代步数为 20 次，两次最大迭代误差为 0.02，设置上限扫频范围分别为 3 GHz 和 4.8 GHz 以及扫频步长为 0.01 GHz，选择 S 参数中的 S_{11} 和 S_{12} ，单位设置为 dB，在进行了整体的正确性和完整性自检验证后，开始仿真，得到 S 参数如图 5 所示。

从仿真曲线图看到，该带通滤波器的性能接近预期指标。其中心频率为 3.81 GHz， S_{11} 和 S_{21} 分别为 -1.21 dB 和 -30.675 dB，通带带宽相对而言却较窄，达到了 120 MHz，该带通滤波器的性能基本达到了预期指标。通过加工(见图 6)，测试加工后实物的包括 S 参数在内的各项性能指标，测试发现与软件仿真的结果一致，证明该带通滤波器设计的正确性，因此用 HFSS 仿真软件可以准确、快速地设计带通滤波器，让学生通过实际的器件设计运用课堂上所学的理论知识，通过测试加工熟悉带通滤波器的整个设计过程，辅助教师对带通滤波器的教学。通过期末试卷分析，该课题组成员在带通滤波器等相

关知识点的期末考试中得分率高，从而说明了使用电磁仿真软件进行带通滤波器的设计提升了学生对该知识的理解与掌握。

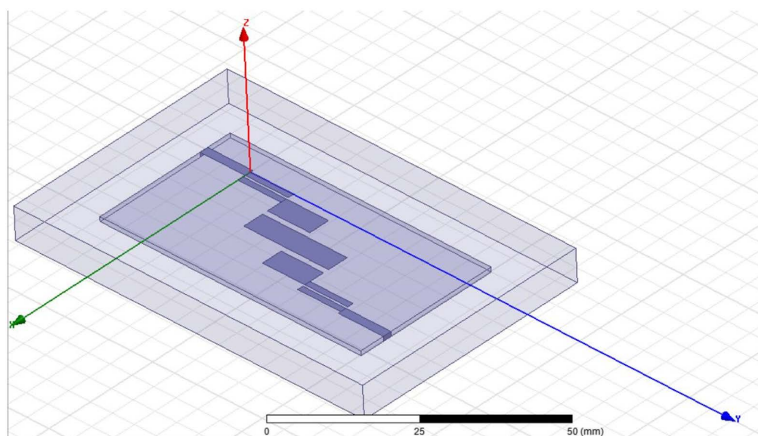


Figure 4. Design picture of band pass filter
图 4. 带通滤波器的 HFSS 设计图

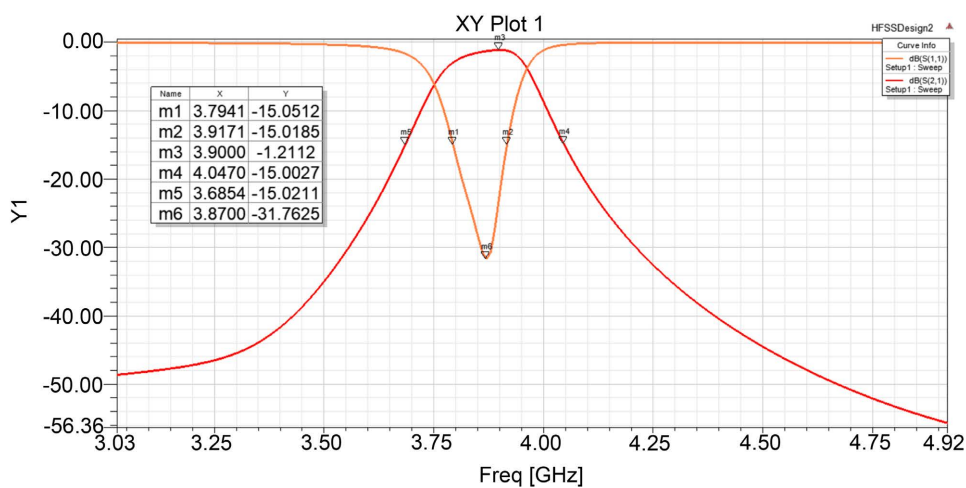


Figure 5. S parameters of band pass filter
图 5. 带通滤波器的 S 参数

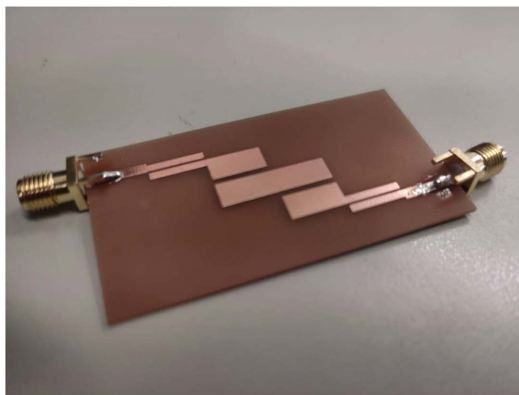


Figure 6. Fabrication of band pass filter
图 6. 带通滤波器的加工实物

此外, HFSS 仿真软件还可以对其他的微波器件进行仿真, 如功分器、耦合器、天线、电缆等, 均可以很方便的获得实时的性能指标参数, 如 S 参数, 增益, 三维方向图, 阻抗匹配度等。通过加工实物, 验证软件仿真的正确性, 从而辅助微波器件的设计与教学。通过该方法, 可以让学生能很直观的感受电磁全波仿真软件在设计、仿真微波器件上的快捷与高效, 从而为其毕业之后从事微波器件的设计工作打下坚实、良好的基础。期末试卷分析结果表明, 全波电磁仿真软件在《微波工程》课程中的应用, 使得该课程的平均分相较往年有较大提升, 取得了非常不错的教改效果。

5. 结语

本文提出了将电磁全波仿真软件引入《微波工程》的教学中, 说明了计算机辅助设计在电磁场与无线技术的专业课程《微波工程》中的应用, 通过经典教学案例平面带阻滤波器、带通滤波器的设计, 详细描述了如何通过电磁全波仿真软件对《微波工程》进行教学。通过这样的教学改革, 在电磁仿真软件的帮助下, 把深奥难懂的理论知识和实际的微波无源器件的设计进行简化, 从而提升了该课程的授课效果, 促进学生掌握课程的内容, 强化了学生的实际操作能力, 非常有利于学生毕业后从事相关工作, 为培养宽口径、高素质的人才打下坚实的基础。

基金项目

南京邮电大学高水平师资项目(NY220074)。

参考文献

- [1] Pozar, D.M. (2011) *Microwave Engineering*. John Wiley & Sons, New York.
- [2] 白明, 方霄, 苗俊刚. MathCAD “微波工程”教学中的应用[J]. 电气电子学报, 2013, 35(6): 104-106.
- [3] 唐书娟, 张智军, 卢丁丁. 微波工程系列课程形象化教学探究[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(10): 233-236.
- [4] 赵春晖, 廖艳苹, 崔颖. “微波工程”系列课程建设经验与成效[J]. 中国大学教学, 2013(6): 40-42.
- [5] 梁振光. MATLAB 在“电磁场”教学中的应用[J]. 电气电子教学学报, 2004, 26(3): 105-109.
- [6] 李明洋, 刘敏. HFSS 天线设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [7] 聂在平, 方大纲. 目标与环境电磁散射特性建模: 理论, 方法与实现(基础篇)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [8] Arabsalmanabadi, B., *et al.* (2021) A Three-Dimensional Discontinuous Galerkin Time Domain Finite Element Method for Electromagnetic Modeling of Wireless Power Transfer Coils. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 2, 360-371. <https://doi.org/10.1109/OJIES.2021.3077389>
- [9] Lu, J., Zhao, X. and Yamada, S. (2016) *Harmonic Balance Finite Element Method: Applications in Nonlinear Electromagnetics and Power Systems*. John Wiley & Sons, New York. <https://doi.org/10.1002/9781118975770>
- [10] Sadiku, M.N.O. (2018) *Computational Electromagnetics with MATLAB*. Taylor & Francis Group, New York. <https://doi.org/10.1201/9781315151250>
- [11] Cao, X.Y., *et al.* (2018) A Goal-Oriented Adaptive Finite Element Method for 3D MT Anisotropic Modeling with Topography. *Chinese Journal of Geophysics*, 61, 2618-2628.
- [12] Dodig, H., *et al.* (2021) On the Edge Element Boundary Element Method/Finite Element Method Coupling for Time Harmonic Electromagnetic Scattering Problems. *Numerical Methods in Engineering*, 122, 3613-3652. <https://doi.org/10.1002/nme.6675>
- [13] Bai, J.W., Cao, Y., *et al.* (2018) Modeling and an Immersed Finite Element Method for an Interface Wave Equation. *Computers & Mathematics with Applications*, 76, 1625-1638. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2018.07.015>
- [14] Mittra, R. (2016) *Computational Electromagnetics*. Springer-Verlag, New York.
- [15] HFSS 百度百科[EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/hfss/11011399>