

HFSS

射频仿真设计 实例大全

■ 徐兴福 主编

- 仿真中级教程，采用 HFSS15 版本
- 立足工程设计应用，部分案例做出实物
- 业界强强联合，多名射频工程师联袂出品



EDA 精品智汇馆

HFSS 射频仿真设计实例大全

徐兴福 主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书讲解了 HFSS 操作方法, 并提供了大量的工程设计实例, 分为基础篇 (1~6 章) 和实例篇 (7~21 章)。基础篇包括 HFSS 功能概述、HFSS 建模操作、网格划分设置、变量设置与调谐优化、仿真结果输出, 以及 HFSS 与其他软件的联合、数据输入/输出等; 实例篇包括 PCB 微带线、微带滤波器、腔体滤波器、介质滤波器、功分器、耦合器、微带天线、GPS/北斗天线、键合线匹配、SMA 头、LTCC、DRO、频率选择表面的设计与仿真。

本书实例与工程运用结合非常紧密, 全面讲解了使用 HFSS 设计各种射频电路及元器件, 可供无线通信产品设计的射频工程师使用, 也可作为高等院校电子通信类专业教学参考书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

HFSS 射频仿真设计实例大全 / 徐兴福主编. —北京: 电子工业出版社, 2015.5
(EDA 精品智汇馆)
ISBN 978-7-121-25923-4

I. ①H… II. ①徐… III. ①射频电路—电路设计—计算机辅助设计—应用软件 IV. ①TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 081677 号

责任编辑: 王敬栋 (wangjd@phei.com.cn) 文字编辑: 张 迪

印 刷: 北京京科印刷有限公司

装 订: 三河市华成印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 37.5 字数: 960 千字

版 次: 2015 年 5 月第 1 版

印 次: 2015 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 99.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

本书创作团队成员

(按姓氏笔画排序)

王小军	任建	刘宁	刘晓龙
李帅	李成龙	杨晓强	陈亮
陈瑞瑞	罗显虎	徐中挺	徐兴福
徐晓宁	高宽栋	高雅	常登辉
谢志东			

本书主要作者简介

徐兴福

网名飞雪连天，eda365.com 射频天线板块版主，“兴森科技-安捷伦联合实验室”射频负责人，从事射频电路设计 10 余年。对射频电路、微带电路、PCB 板级信号完整性、仿真与实际结果闭环等方面有着丰富的经验和深入的研究，经典仿真与设计教程《ADS2008 射频电路设计与仿真实例》与《ADS2011 射频电路设计与仿真与实例》（电子工业出版社）主编。

高宽栋

电子科技大学博士，擅长射频前端的无源器件设计、滤波器设计、射频前端系统设计与实现、通信基带算法、雷达基带算法等应用。

任建

香港城市大学毫米波国家重点实验室博士，主要研究领域包括微带天线设计、超宽带相控阵天线设计、DRA、Metamaterial 及太赫兹技术，参与多个科研项目，精通电磁场仿真软件，先后发表学术论文 13 篇。

谢志东

资深射频工程师，金领电子研发部副经理，无源器件 10 年的研发经验，擅长介质滤波器和微带天线的仿真与设计，拥有 CN101908666A、CN203039110U 等多项滤波器和天线相关技术专利。

杨晓强

西安电子科技大学电磁场与微波技术专业研究生，主要研究方向为相控阵天线、卫星通信天线及微带天线，负责完成多个天线项目的研制工作，工程经验丰富，发表 7 篇学术论文（均为 EI 检索），国家专利 3 项。

刘晓龙

射频工程师，大连海事大学信息与通信工程专业硕士，在校期间所属实验室为大连海事大学和安捷伦联合实验室，现就职京信通信，参与天线和功分器、移相器的研发工作，有多年的天线与无源器件仿真与设计经验。

高雅

电子科技大学微波毫米波技术暨超导应用技术研究中心研究生，主要研究方向为微波



毫米波电路与系统，拥有多种微波元器件研发经验，并已发表多篇微波方向学术论文。

罗显虎

电子科技大学微波毫米波技术暨超导应用技术研究中心硕士，主要研究方向为射频微波接收机前端电路与系统，使用 HFSS 成功完成多款天线、滤波器、耦合器等产品研发，并已发表多篇学术论文。

刘宁

射频工程师，毕业于西安电子科技大学雷达技术专业，现就职于华为技术有限公司。

陈亮

国防科学技术大学电磁场与微波技术专业研究生，长期从事人工电磁材料的研究，有多年使用 HFSS 进行频率选择表面及天线阵列的设计和仿真经验。

徐中挺

射频工程师，毕业于电子科技大学通信与信息工程专业，无线电爱好者，爱好射频 DIY，擅长 HFSS 仿真和建模，尤其对 HFSS 建模技巧有非常独到的研究。

前 言

现在的产品设计，不管是结构制图，还是电路板的设计，以及电子电路仿真都离不开新兴的 EDA 软件。作为射频工程师，必须掌握两种以上电路仿真设计软件：对电路仿真，具有代表性的是 Keysight 的 ADS；对于场仿真、结构类微波器件的仿真，具有代表性的是 Ansys 的 HFSS。目前这两款软件在企业、高校及研究所有着非常广泛的应用。

Ansys HFSS 软件是三维全波电磁场仿真的行业标准。HFSS 无与伦比的精度、先进的求解器和计算技术使得它成为高频和高速电子元件设计工程师的必备工具。HFSS 提供了众多基于有限元、积分方程和高级混合方法的最先进求解器技术，可满足各种微波、RF 和高速电路求解及应用。

本书采用较新的 HFSS15 版本作为平台，按照软件仿真设计的顺序流程，由浅入深、从功能介绍到工程应用，系统讲解了 HFSS 用于射频微波电路设计的方法。目前市面上有不少 HFSS 的书籍，但是学完只掌握了软件的基本操作，为了能让读者快速掌握这款实用软件并运用工程设计，编者组织了一批有设计经验的射频工程师编写此书，做到理论、仿真、实际相结合，并将书中部分案例做出实物且进行了测试对比，工程性非常强。

该书有 21 章，分为基础篇和实例篇：

基础篇（1~6 章）：内容包括 HFSS 基本功能、建模、网格、变量设置、调谐优化、仿真结果和数据输出，以及 HFSS 和第三方软件的结合。

实例篇（7~21 章）：内容包括微带线、微带滤波器、腔体滤波器、介质滤波器、功分器、耦合器、微带天线、GPS/北斗天线、键合线匹配、SMA 头、LTCC、DRO、频率选择表面的设计与仿真。

编者根据在校学生及工程师应用需要编写此书，提供大量的仿真设计实例，希望能起到抛砖引玉的作用。最后非常感谢电子工业出版社方面给予的建议及各个方面的支持，同时对本书参考 Ansys 公司和网上较多文献资料，在此一并表示感谢！

由于编者水平有限，书中错误在所难免，希望各位同行批评指正（电子邮件 bruce_xuxf@126.com）。

编 者
2015.3.5

目 录

基础篇

第1章	HFSS 功能概述	1
1.1	概述.....	1
1.2	HFSS 功能特点.....	2
1.3	HFSS 基础知识.....	5
1.4	HFSS 的边界条件.....	7
1.5	HFSS 中的激励源.....	10
1.6	HFSS 仿真常用设置.....	12
1.7	本章小结.....	14
第2章	HFSS 建模操作	15
2.1	建模相关自定义选项的设置.....	15
2.2	基础参数化建模.....	18
2.3	建模操作几何变换.....	25
2.4	坐标系的选择.....	30
2.5	创建 3D 几何模型实例.....	34
2.6	HFSS 高级建模.....	36
2.7	本章小结.....	38
第3章	网格划分设置	39
3.1	有限元简介.....	39
3.2	设置求解频率.....	39
3.3	收敛误差.....	44
3.4	查看网格剖分情况.....	45
3.5	高级网格设置.....	47
3.6	应用网格设置.....	48
3.7	本章小结.....	48
第4章	变量设置与调谐优化	49
4.1	变量.....	49

4.1.1	变量类型	49
4.1.2	变量定义	50
4.1.3	添加、删除和使用变量	51
4.2	调谐分析	54
4.3	统计分析	55
第5章	仿真结果输出	56
5.1	回波损耗 S_{11}	56
5.2	输入阻抗 Z_{in}	58
5.3	导纳 Y	59
5.4	Smith 圆图	60
5.5	电压驻波比 VSWR	62
5.6	方向图	63
5.6.1	二维增益方向图	63
5.6.2	三维方向图	67
5.7	数据及图形的输出	69
5.8	本章小结	71
第6章	HFSS 与其他软件的联合	72
6.1	HFSS 与 Ansoft designer 的协同仿真	72
6.1.1	新建工程设置	72
6.1.2	模型建立	73
6.1.3	端口和边界条件的设置	77
6.1.4	仿真和参数扫描设置	79
6.1.5	Ansoft designer 模型导入	81
6.1.6	HFSS 模型的使用	84
6.1.7	Ansoft designer 仿真设置	88
6.2	HFSS 模型的导出与导入	90
6.2.1	HFSS 平面模型的导出	90
6.2.2	HFSS 三维模型的导出和导入	94
6.3	HFSS 数据的导出与导入	97
6.3.1	常用图表数据文件的导出与导入	97
6.3.2	sNP 数据文件的导出和导入	99
6.4	HFSS 与 Matlab 之间的联合仿真	103

实例篇

第7章	PCB 微带线仿真	107
------------	------------------	------------



7.1	微带线特性阻抗的仿真分析	107
7.2	不连续性对微带线影响的仿真分析	107
7.3	差分特性阻抗仿真	129
第8章	Ku 波段微带发夹线滤波器仿真	147
8.1	微带滤波器基本原理	147
8.1.1	微带线谐振器	147
8.1.2	耦合系数矩阵及滤波器的拓扑结构	147
8.1.3	外部品质因数	148
8.2	设计目标	150
8.3	整体图形	150
8.4	HFSS 仿真步骤	152
8.4.1	谐振器的设计	152
8.4.2	耦合系数与谐振器间距的关系	164
8.4.3	外部品质因数与抽头位置的确定	166
8.4.4	滤波器的设计和优化	167
8.4.5	滤波器的优化仿真	180
8.5	本章小结	184
第9章	介质滤波器	185
9.1	滤波器指标要求及设计思路	185
9.1.1	滤波器指标要求	185
9.1.2	设计思路	185
9.2	用 MWO (Micro Wave Office) 确定滤波器的阶数	186
9.3	MWO (Micro Wave Office) 路仿真	189
9.3.1	设置 Project Options	189
9.3.2	绘制原理图	189
9.3.3	新建 Graph	192
9.3.4	设置优化目标及分析	194
9.4	HFSS 建模	196
9.4.1	新建工程	196
9.4.2	新建空气腔体	196
9.4.3	新建陶瓷块	198
9.4.4	新建内导体	202
9.5	新建外导体	204
9.5.1	新建下表面外导体	204
9.5.2	新建左右表面外导体	205
9.5.3	新建前后外导体	207

9.5.4	新建 I/O Port	208
9.6	HFSS 设置变量	209
9.7	HFSS 设置边界条件	211
9.8	HFSS 设置求解分析	213
9.9	HFSS 优化	217
9.9.1	计算合适的滤波器长度	217
9.9.2	分析计算合适的耦合	221
9.9.3	联合分析计算合适的耦合与长度	223
9.9.4	微调	226
9.9.5	设置优化目标自动优化	228
9.9.6	小型化	231
9.10	实物测试与仿真结果比较	233
9.11	本章小结	234
第10	章 腔体滤波器的设计与仿真	235
10.1	腔体滤波器结构的预估	235
10.2	谐振单元和耦合系数的仿真	238
10.2.1	谐振单元仿真	238
10.2.2	耦合系数的仿真	252
10.3	全波滤波器的建模与仿真	266
10.3.1	全波滤波器的建模	266
10.3.2	全波滤波器的仿真计算	272
10.4	本章小结	276
第11	章 微带一分四功分器的设计与仿真	277
11.1	微带 T 型功分器的基本原理	277
11.2	微带 T 型功分器的 HFSS 建模分析	277
11.3	查看并分析 HFSS 仿真结果	300
第12	章 微带定向耦合器设计与仿真	305
12.1	X 波段微带定向耦合器设计要求	305
12.2	HFSS 建模步骤	305
12.3	仿真	316
12.4	改善方向性	321
第13	章 宽带非对称多节定向耦合器设计	330
13.1	非对称多节定向耦合设计原理与 HFSS 设计概述	330
13.1.1	非对称多节定向耦合器设计概述	330



13.1.2	HFSS 设计环境概述	331
13.2	创建非对称定向耦合器模型 HFSS 环境	332
13.3	创建非对称多节定向耦合器模型	332
13.3.1	设置默认模型长度单位	332
13.3.2	建模及边界设置相关选项设置	333
13.3.3	建模介质基板	334
13.3.4	建模非对称多节耦合器	337
13.4	非对称多节定向耦合边界条件和激励	350
13.4.1	非对称多节定向耦合器边界条件	350
13.4.2	非对称多节定向耦合器激励设置	351
13.5	非对称多节定向耦合 HFSS 求解设置	357
13.5.1	求解设置	357
13.5.2	扫频设置	357
13.6	检查和运行仿真分析	358
13.7	查看仿真结果	358
13.8	参数扫描分析	360
13.9	优化变量设置与分析	362
13.10	最终结果与导出版图	365
13.11	本章小结	368
第14章	侧馈/同轴馈电矩形微带天线设计	369
14.1	天线尺寸计算	369
14.2	HFSS 软件建模	370
14.3	同轴馈电矩形微带天线仿真实例	387
第15章	微带八木天线设计与仿真	395
15.1	微带八木天线理论	395
15.2	设计目标	398
15.3	设计的整体图形	398
15.4	HFSS 仿真步骤	398
15.5	本章小结	414
第16章	GPS 北斗双模微带天线设计与仿真	415
16.1	设计指标要求	415
16.2	设计方案	415
16.3	初始尺寸计算	417
16.4	新建 HFSS 工程与设计	418
16.5	模型创建	418

16.6	求解和扫频设置	431
16.7	设计检查和运行仿真分析	433
16.8	查看回波损耗	434
16.9	查看 Smith 圆图结果	434
16.10	参数扫描分析	435
16.11	查看调整后的天线性能	440
16.12	本章小结	447
第 17	章 DRO 谐振器设计与仿真	448
17.1	DRO 设计原理	449
17.2	谐振腔体设计	449
17.2.1	新建 HFSS 工程	449
17.2.2	谐振腔体建模	450
17.2.3	建立圆柱形谐振腔体模型	450
17.2.4	设置边界条件和激励	453
17.2.5	求解设置	454
17.2.6	检查设计和仿真	454
17.2.7	查看仿真结果	455
17.3	10GHz DRO 实例仿真	459
17.3.1	建立仿真模型	459
17.3.2	添加材料	462
17.3.3	设置边界条件和激励	463
17.3.4	求解设置	466
17.3.5	检查设置和运行仿真	466
17.3.6	查看仿真结果并分析	467
17.3.7	优化设计	469
17.3.8	导出仿真数据	472
第 18	章 SMA 头端接 50 欧微带线仿真	474
18.1	射频同轴连接器简介	474
18.1.1	连接器常见的几种安装方式	474
18.1.2	可拆卸式 SMA 连接器的模型及原理分析	475
18.2	可拆卸式 SMA 连接器的 HFSS 模型和设计指标	476
18.2.1	HFSS 模型整体图形	476
18.2.2	可拆卸式 SMA 连接器 HFSS 模型参数	476
18.2.3	技术指标要求	477
18.3	HFSS 仿真实例: Ku 波段可拆卸式 SMA 接头转 50 欧姆微带线仿真	477
18.3.1	新建 HFSS 工程	477

18.3.2	创建 50 欧姆微带线模型	479
18.3.3	创建玻璃绝缘子模型	482
18.3.4	设置端口和求解、运行仿真并查看结果	489
18.3.5	设置参数扫描并查看结果	494
18.4	本章小结	497
第 19 章	键合线与 PCB 互连匹配电路设计	498
19.1	基本原理	498
19.2	设计目标	500
19.3	HFSS 设计步骤	501
19.4	本章小结	522
第 20 章	LTCC 无源器件的设计与仿真	523
20.1	LTCC 技术概述	523
20.1.1	LTCC 的概念	523
20.1.2	LTCC 的技术特点	524
20.1.3	LTCC 的应用领域	525
20.1.4	LTCC 的工艺流程	525
20.2	LTCC 滤波器基本理论	526
20.2.1	LTCC 滤波器	526
20.2.2	内埋置电感	528
20.2.3	内埋置电容	529
20.2.4	梳状线结构的带状线滤波器理论	530
20.2.5	LTCC 中的带状线	531
20.3	LTCC 滤波器设计与仿真	532
20.3.1	三维模型	533
20.3.2	求解设置	546
20.3.3	仿真分析	556
20.3.4	参数扫描	559
20.4	本章小结	566
第 21 章	频率选择表面仿真	567
21.1	频率选择表面基本理论	567
21.2	设计目标和整体图形	568
21.3	HFSS 设计步骤	568
21.4	本章小结	583

基础篇

第1章 HFSS 功能概述

1.1 概述

HFSS (High Frequency Structure Simulator) 是由 Ansys 公司推出的三维电磁仿真软件, 是世界上第一个商业化的三维结构电磁场仿真软件、业界公认的三维电磁场设计和分析的工业标准。

HFSS 经过 20 多年的发展, 已经是电子设计人员, 尤其是电磁仿真人员, 必不可少的工具。在射频、微波、天线、高速电路等领域得到了广泛应用, 已成为三维全波电磁场仿真的行业标准和黄金工具, 是工程师们的得力助手。为了应对快速发展的设计需求, 除了仿真功能的不断扩展外, HFSS 对高性能计算的支持也更加深入和广泛, 不断提高仿真速度、扩展仿真规模, 发展至今的 V15 版本。

HFSS15 相对于以前版本更新的内容包括: 更快的矩阵求解器与 HPC、全新升级的有限大阵列求解器、更加灵活和强大的混合算法、改进的宽带扫频、更完善的多物理场求解流程等, 此外, 与 ECAD 的接口、瞬态求解器、易用性等方面也有显著增强。

HFSS 适用领域如下所示。

- 高频组件: LTCC、介质振荡器、耦合器、滤波器、隔离器、功分器、芯片部件、磁珠等。
- 天线: 贴片天线、角锥天线、阵列天线、Vivaldi 天线、八木天线等。
- 电缆: 同轴电缆、双绞线电缆、带状电缆等。
- IC 封装: 引脚型 (QFP、PLCC、DIP、SOP 等)、PGA、BGA、TAB、功率器件 (IGBT、功率 MoSFET、DBC 基板等)、MCM 等。
- 连接器: 同轴连接器、多脚连接器 (端子型、卡槽型等)、插针插座等。
- PCB 板: 裸板、平面、传输线、网格平面、硬板、混合板、柔性板。
- 其他: RFID、无线充电、EMC/EMI、核磁共振、微波加热、光电接口。

图 1.1 为 HFSS 工作界面。

HFSS 提供了简洁直观的用户设计界面、精确自适应的场求解器、拥有空前电性能分析能力的功能强大后处理器, 能计算任意形状三维无源结构的 S 参数和全波电磁场。HFSS 软件拥有强大的天线设计功能, 它可以计算天线参量, 如增益、方向性、远场方向图剖面、远场 3D 图和 3dB 带宽; 绘制极化特性, 包括球形场分量、圆极化场分量、Ludwig 第三定义场分量和轴比。

使用 HFSS, 可以计算的参数与输出结果如下所示。

- S 参数、Y 参数、Z 参数。

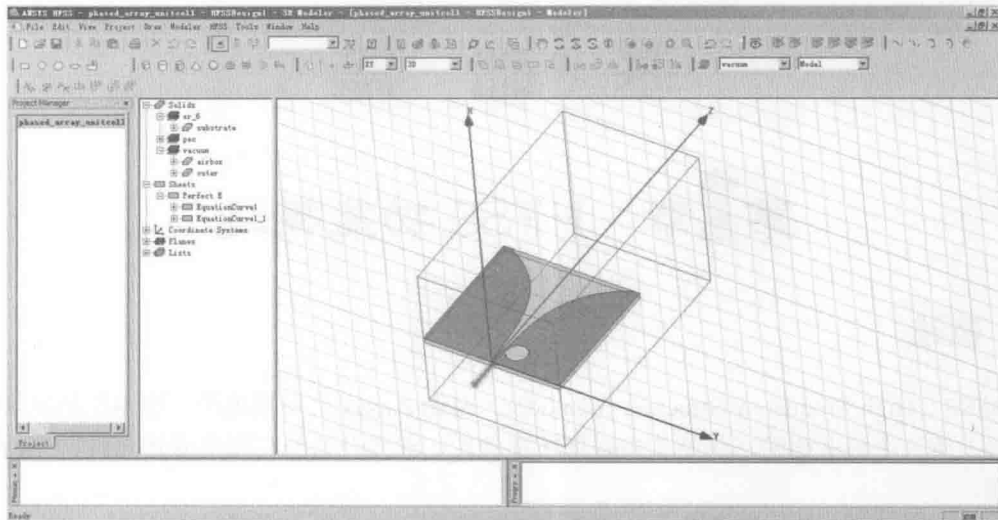


图 1.1 HFSS 工作界面

- TDR。
- 端口面的传播模式和端口阻抗。
- Touchstone 文件、Spice 网表。
- 差模/共模传输线特性。
- 辐射特性（方向图、增益、3/5/10m 远场）。
- 单站、双站 RCS。
- 电磁场显示（散射场、矢量场）。
- 电场、磁场、电流密度、功率损耗等，场计算器可以得到的各种物理量。

1.2 HFSS 功能特点

1. 电磁求解技术

HFSS 提供了诸多最先进的求解器技术，用于高频电磁场仿真。强大的求解器基于成熟的有限元法、完善的积分方程法，以及结合了两者优势的混合算法，在易用的设计环境中为用户提供了最先进的计算电磁学方法。

包括：频域求解器、瞬态求解器、积分方程（IE）求解器、物理光学求解器、混合有限元——积分方程法（FE-BI）求解器、平面 EM。

2. HFSS 3-D 建模器

3D 界面使用户能够建模复杂的 3D 几何结构或导入 CAD 几何结构。通常情况下，3D 模式可用于建模和仿真天线、RF/微波组件和生物医疗设备等高频组件。工程师能够抽取散射矩阵参数（S、Y、Z 参数），对 3D 电磁场（远近场）进行可视化，并生成可链接到电路仿真的 ANSYS 全波 SPICE 模型。该建模器包含了参数功能，能方便地帮助

工程师定义变量，根据设计趋势、优化敏感度和统计分析变更设计。如图 1.2 所示为创建的手机模型。

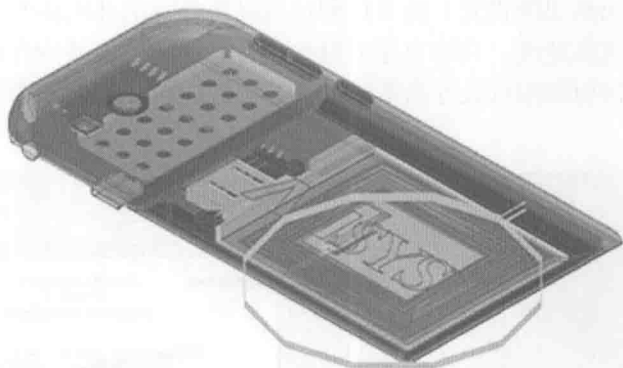


图 1.2 创建的手机模型

3. 先进的有限大阵列天线仿真

HFSS 软件能够计算有限大尺寸的相控阵天线的电磁效应，包括单元间互耦及阵列边缘效应等。

传统仿真大型相控阵天线的方法是假定其为无限大阵列以估算天线性能。在这种方法中，一个或多个天线单元的周围设置为周期性边界，形成一个基本单元，周期性边界分别在两个方向将场径向形成无限多单元的阵列。在过去的很多年中，工程师利用 HFSS 中周期性边界条件功能仿真无限大相控阵天线，并提取每个单元的阻抗和单元辐射方向图，其中包含了所有的互耦效应。该方法对某些扫描条件下的阵列盲区预测非常有效，但是无法获得有限大尺寸阵列的特性，也即阵列边缘效应。如图 1.3 所示为天线阵仿真。

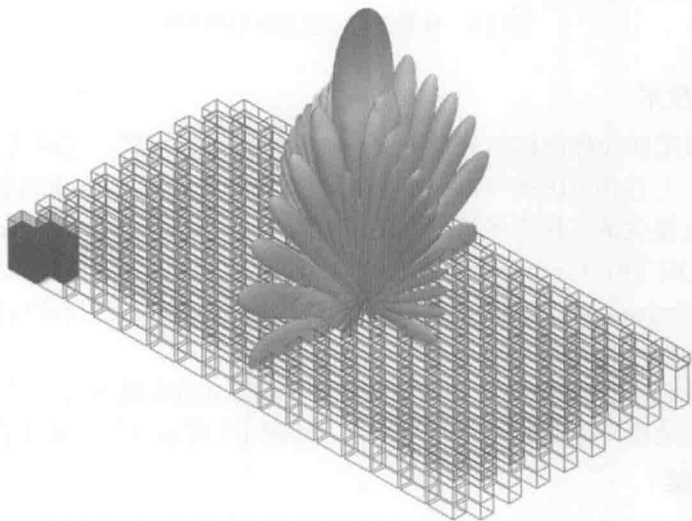


图 1.3 天线阵仿真