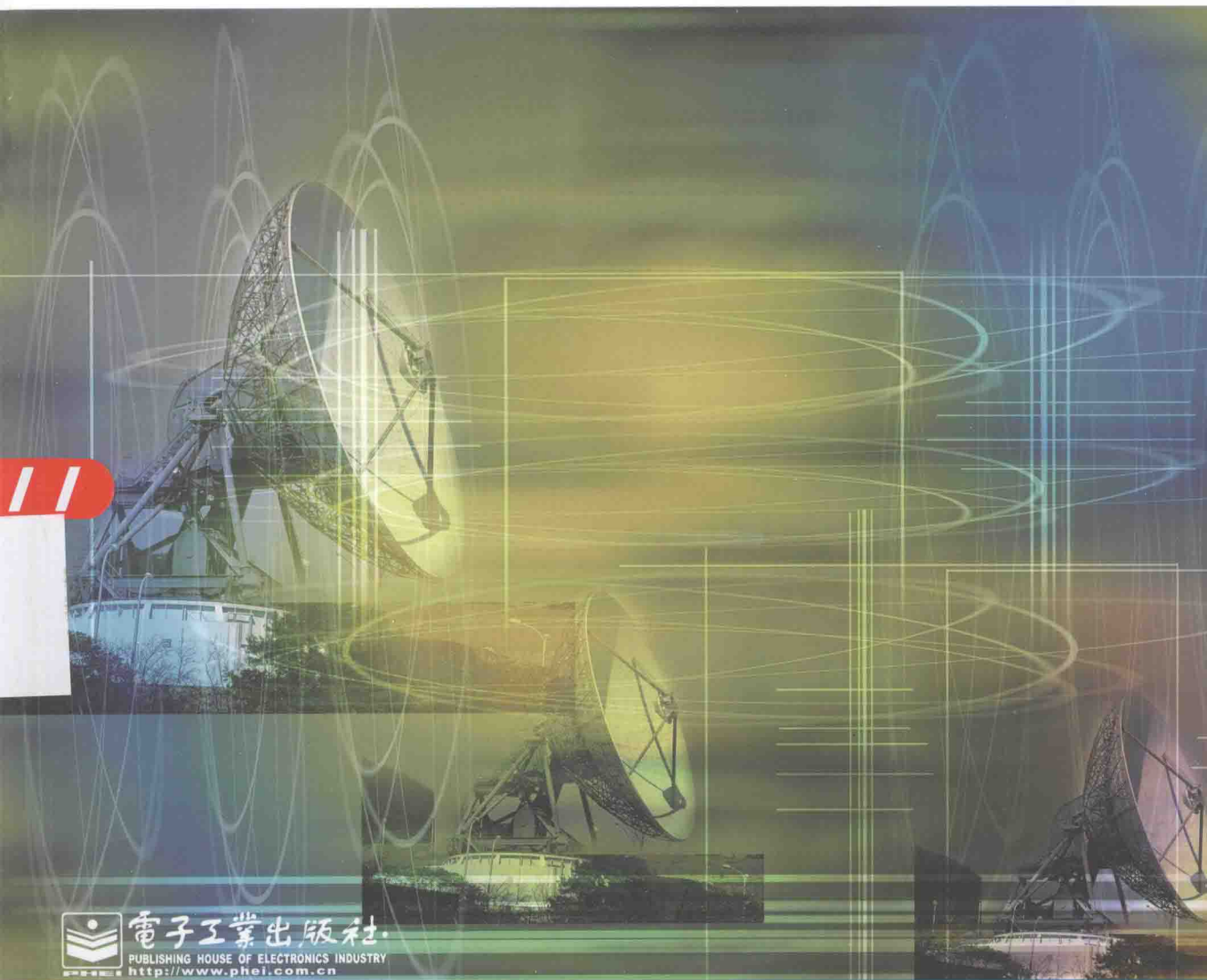


Broadview®
www.broadview.com.cn

HFSS 天线设计 (第2版)

李明洋 刘敏 编著



 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

HFSS 天线设计 (第2版)

李明洋 刘敏 编著

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍天线设计的理念及如何使用 HFSS 仿真软件来仿真分析和设计各类天线,包括微带天线、极子天线、喇叭天线、PIFA 天线和天线阵列等。全书理论和工程实践紧密结合,多从工程角度出发,直观、透彻地讲解使用 HFSS 进行天线设计的全过程。借助于 HFSS 仿真工具,让天线设计不再困难。相信有志于进入天线设计领域的读者读完本书后,一定可以熟悉 HFSS 软件的使用,进而掌握天线设计的要领。

本书兼顾天线设计理论和 HFSS 天线设计实践,适合无线通信、微波射频、天线设计领域的工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业的教学用书。

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 天线设计/李明洋,刘敏编著. —2 版. —北京:电子工业出版社,2014.4
ISBN 978-7-121-22587-1

I. ①H… II. ①李…②刘… III. ①天线设计—计算机仿真—应用软件 IV. ①TN82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 040478 号

责任编辑:贾 莉

印 刷:北京市京科印刷有限公司

装 订:三河市皇庄路通装订厂

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:20.25 字数:557 千字

印 次:2014 年 4 月第 1 次印刷

印 数:3000 册 定价:69.00 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 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

近年来，无线通信产业在国内蓬勃发展，诸如手机、WLAN 无线网卡、射频识别 (RFID)、蓝牙和全球卫星定位系统 (GPS) 等产品都需要使用天线来发射和接收无线电信号，因此业界对天线设计人才的需求与日俱增。HFSS 是美国 Ansoft 公司开发的一款基于电磁场有限元法的全波三维电磁仿真软件，可为天线及天线系统设计提供全面的解决方案，精确仿真计算出天线的各种性能，包括天线的辐射方向图、天线增益、轴比、表面电流分布、天线输入阻抗、电压驻波比以及 S 参数等性能参数。借助于 HFSS 软件，工程师可以更加便捷、高效地设计出各种类型的天线，从而有效地降低设计成本，提高工作效率，缩短设计周期，增强竞争力。

本书内容

本书主要介绍天线设计的基本概念以及使用 HFSS 软件仿真设计各种类型天线的分析方法、设置操作和设计流程。书中给出了微带天线、极子天线、喇叭天线、PIFA 天线和天线阵等多种不同类型天线的 HFSS 仿真分析流程和设计工程实践。

全书共分 10 章，第 1 章主要介绍天线的辐射机理以及表征天线各项性能参数的定义。第 2 章首先简要介绍使用 HFSS 软件进行天线设计的基本流程，然后详细介绍 HFSS 天线设计流程中每个设计步骤的具体操作和设置。第 3~9 章是 HFSS 天线设计的工程实践部分，介绍几种常用天线的基本理论、分析方法和 HFSS 仿真设计操作。其中，第 3 章主要介绍偶极子和单极子天线的理论与 HFSS 仿真设计实例；第 4 章主要介绍微带天线的理论和设计实例、双频天线和圆极化天线的实现，以及在 HFSS 中如何分析和设计双频与圆极化天线；第 5 章主要介绍倒 F 天线的衍变发展过程和其结构，并给出了使用 HFSS 设计分析一款工作于 2.4GHz ISM 频段印制电路板 IFA 天线的详细过程；第 6 章主要介绍手机上常用的平面倒 F 天线 (PIFA) 的理论和设计实例，给出了 PIFA 天线的基本结构、性能分析、电流/电场分布以及多频段工作的实现，本章同时也详细介绍了使用 HFSS 设计分析一款工作于 GSM900 频段的单频 PIFA 天线和一款工作于 GSM900/DCS1800 频段的双频 PIFA 天线的具体过程；第 7 章主要介绍喇叭天线理论以及如何使用 HFSS 设计喇叭天线，在本章中还讲解了双模天线的概念以及在 HFSS 中如何实现双模激励；第 8 章主要介绍天线阵

的设计，包括均匀直线阵列天线阵因子的理论分析，以及阵元的设计分析、馈电网络的设计分析和整个天线阵列的 HFSS 设计分析全过程，第 9 章主要介绍 HFSS IE 仿真器的使用，并对比了 HFSS IE 仿真器和传统的 HFSS 仿真器的区别。在本书的最后，即第 10 章，介绍 HFSS 的天线辅助设计工具——Antenna DesignKit 的使用。

本书特点

全书理论和工程实践紧密结合，从工程角度出发，直观、透彻地讲解使用 HFSS 进行天线设计的全过程，不仅要让读者学习到各种类型天线的基本理论、设计方法，以及使用 HFSS 软件进行天线设计的详细流程和具体操作，还力求让读者理解为什么要这样操作。知其然并知其所以然，从而能够熟练掌握这些设计应用，达到举一反三、活学活用的学习目标。

本书结合 HFSS 软件从工程角度讲解天线设计，借助于 HFSS 软件，把复杂的理论直观化，让天线设计不再是一件难的事情。

全书理论和工程实践紧密结合，每个设计实例都是先从理论讲起，然后讲解 HFSS 的具体设计思路和设计过程。

本着“授人以鱼，不如授人以渔”的原则，本书不仅清楚地阐述了 HFSS 天线设计的每一步操作，还着重讲解了为什么要这样做。

本书所有的天线设计实例都创建了 HFSS 参数化模型，方便读者在后续学习中更改天线结构尺寸。

资源下载和技术支持

为了帮助读者更好地使用本书进行学习，作者提供了书中每个设计实例的 HFSS 源文件。相关设计文件读者可以登录易迪拓培训（网址：www.edatop.com）下载。

另外，为了尽可能地节约读者的学习时间，提高学习效率，作者还主讲并制作推出了《两周学会 HFSS》、《HFSS 微波器件仿真设计实例》、《HFSS 天线设计入门》和《PCB 天线 HFSS 设计实例》等多套视频培训课程。视频课程边操作边讲解，能够以更加直观、生动、高效的方式帮助读者在最短的时间内迅速熟悉并掌握 HFSS 的设计应用。有关 HFSS 视频课程的详情，读者也可以登录易迪拓培训（www.edatop.com）查看。

关注作者：<http://t.qq.com/edatop>（腾讯微博）

<http://weibo.com/mweda>（新浪微博）

李明洋

十载耕耘 奠定专业地位

以书为证 彰显卓越品质

博文视点诚邀精锐作者加盟

《C++Primer (中文版) (第5版)》、《淘宝技术这十年》、《代码大全》、《Windows内核情景分析》、《加密与解密》、《编程之美》、《VC++深入详解》、《SEO实战密码》、《PPT演义》……

“圣经”级图书光耀夺目,被无数读者朋友奉为案头手册传世经典。

潘爱民、毛德操、张亚勤、张宏江、咎辉Zac、李刚、曹江华……

“明星”级作者济济一堂,他们的名字熠熠生辉,与IT业的蓬勃发展紧密相连。

十年的开拓、探索和励精图治,成就博古通今、文圆质方、视角独特、点石成金的计算机图书的风向标杆:博文视点。

“风翱翔于千仞兮,非梧不栖”,博文视点欢迎更多才华横溢、锐意创新的作者朋友加盟,与大师并列于IT专业出版之巅。

英雄帖

江湖风云起,代有才人出。

IT界群雄并起,逐鹿中原。

博文视点诚邀天下技术英豪加入,

指点江山,激扬文字

传播信息技术,分享IT心得

专业的作者服务

博文视点自成立以来一直专注于IT专业技术图书的出版,拥有丰富的与技术图书作者合作的经验,并参照IT技术图书的特点,打造了一支高效运转、富有服务意识的编辑出版团队。我们始终坚持:

善待作者——我们会把出版流程整理得清晰简明,为作者提供优厚的稿酬服务,解除作者的顾虑,安心写作,展现出最好的作品。

尊重作者——我们尊重每一位作者的技术实力和生活习惯,并会参照作者实际的工作、生活节奏,量身定制写作计划,确保合作顺利进行。

提升作者——我们打造精品图书,更要打造知名作者。博文视点致力于通过图书提升作者的个人品牌和技术影响力,为作者的事业开拓带来更多的机会。



联系我们

博文视点官网: <http://www.broadview.com.cn>

CSDN官方博客: <http://blog.csdn.net/broadview2006/>

投稿电话: 010-51260888 88254368

投稿邮箱: jsj@phei.com.cn



@博文视点Broadview



微信公众平台

博文视点Broadview



目 录

第1章 天线基础	1	3.3.1 印刷偶极子天线的结构	41
1.1 电基本振子的辐射场	1	3.3.2 天线初始尺寸和 HFSS 设计 概述	42
1.2 参考天线的性能参数	3	3.3.3 HFSS 仿真设计	43
1.2.1 方向图	3	3.4 WLAN 双频单极子天线设计	62
1.2.2 辐射强度	4	3.4.1 双频单极子天线的结构	63
1.2.3 方向性系数	4	3.4.2 天线初始尺寸和 HFSS 设计 概述	63
1.2.4 效率	5	3.4.3 HFSS 仿真设计	64
1.2.5 增益	5	3.5 本章小结	80
1.2.6 输入阻抗	5	第4章 微带天线设计	81
1.2.7 天线的极化	5	4.1 微带天线概述	81
1.3 本章小结	6	4.1.1 微带天线的辐射机理	81
第2章 HFSS 天线设计流程	7	4.1.2 微带天线的馈电	82
2.1 HFSS 天线设计流程概述	7	4.1.3 矩形微带天线的特性参数	82
2.2 HFSS 天线设计详细操作	8	4.2 侧馈矩形微带天线设计	85
2.2.1 求解类型	8	4.2.1 设计要求	85
2.2.2 创建天线结构模型	9	4.2.2 设计步骤	85
2.2.3 设置边界条件	9	4.2.3 HFSS 设计概述	86
2.2.4 设置激励方式	11	4.2.4 HFSS 仿真设计	87
2.2.5 设置求解参数	14	4.3 同轴馈电矩形微带天线设计	103
2.2.6 设计检查和运行求解分析	16	4.3.1 设计要求	104
2.2.7 天线问题的数据后处理	17	4.3.2 初始设计	104
2.2.8 Optimetrics 优化设计	17	4.3.3 HFSS 设计概述	104
2.3 本章小结	21	4.3.4 HFSS 仿真设计	105
第3章 偶极子和单极子天线设计	22	4.4 双频微带天线设计	126
3.1 概述	22	4.4.1 设计要求	127
3.1.1 半波偶极子天线	22	4.4.2 HFSS 设计概述	127
3.1.2 单极子天线	24	4.4.3 HFSS 仿真设计	127
3.2 半波偶极子天线设计	25	4.5 圆极化矩形微带天线设计	141
3.2.1 HFSS 设计概述	25	4.5.1 单点馈电圆极化微带天线实现	
3.2.2 HFSS 仿真设计	25		
3.3 印刷偶极子天线设计	41		

原理	141	7.2.3 设计实例分析	253
4.5.2 设计要求	142	7.2.4 HFSS 仿真设计	254
4.5.3 设计步骤	142	7.3 本章小结	267
4.5.4 HFSS 设计概述	142	第8章 微带阵列天线设计	268
4.5.5 HFSS 仿真设计	142	8.1 均匀直线阵列天线理论分析	268
4.6 本章小结	159	8.2 微带阵列天线设计概述	269
第5章 倒F天线设计	160	8.3 阵元设计	270
5.1 倒F天线概述	160	8.3.1 设计概述	270
5.1.1 倒F天线的结构参数分析	160	8.3.2 阵元建模和性能分析	270
5.1.2 倒F天线的辐射特性	162	8.4 馈电网络设计	283
5.2 倒F天线的设计和分析	162	8.5 天线阵列设计	284
5.2.1 倒F天线的模型结构	163	8.5.1 天线阵列设计建模	284
5.2.2 HFSS 仿真设计过程	164	8.5.2 求解设置	291
5.2.3 分析倒F天线的结构参数 对天线性能的影响	181	8.5.3 设计检查和运行仿真计算	292
5.3 本章小结	187	8.5.4 查看分析结果	292
第6章 平面倒F天线 (PIFA) 设计	188	8.6 本章小结	295
6.1 PIFA 天线的基本原理	188	第9章 HFSS - IE 天线设计实例	296
6.1.1 PIFA 天线的基本结构和 由来	188	9.1 设计要求	296
6.1.2 PIFA 天线的谐振频率	189	9.2 HFSS - IE 仿真设计步骤	296
6.1.3 PIFA 天线的带宽	190	9.2.1 新建设计工程	296
6.1.4 PIFA 天线的电场分布和 电流分布	191	9.2.2 设计建模	297
6.1.5 PIFA 天线多频工作的实现	191	9.2.3 求解设置	304
6.2 GSM 900 单频 PIFA 天线的设计 和分析	193	9.2.4 设计检查	306
6.2.1 倒F天线的模型结构	193	9.2.5 查看分析结果	306
6.2.2 PIFA 天线的 HFSS 设计过程	194	9.2.6 保存设计	309
6.2.3 PIFA 天线的结构参数对天线 性能的影响分析	220	9.3 本章小结	310
6.2.4 保存设计	224	第10章 HFSS Antenna Design Kit	311
6.3 GSM 900 和 DCS 1800 双频 PIFA 天线的设计	225	10.1 安装和启动	311
6.4 本章小结	232	10.1.1 Antenna Design Kit 的安装	311
第7章 喇叭天线设计	233	10.1.2 Antenna Design Kit 的启动	311
7.1 矩形口径喇叭天线设计	233	10.1.3 在 HFSS 中集成 Antenna Design Kit	311
7.1.1 矩形口径喇叭天线的理论	233	10.2 Antenna Design Kit 用户界面	312
7.1.2 设计要求和初始设计	234	10.2.1 菜单栏	312
7.1.3 HFSS 仿真设计	235	10.2.2 天线类型	313
7.2 圆形口径双模喇叭天线设计	251	10.2.3 模型显示和参数设置区	314
7.2.1 圆形口径喇叭天线原理	251	10.3 Antenna Design Kit 应用实例	315
7.2.2 双模圆锥喇叭	252	10.3.1 启动 Antenna Design Kit	315
		10.3.2 设置介质基板	315
		10.3.3 选择天线类型并自动创建 设计模型	315
		10.4 本章小结	317

第 1 章

天线基础

自赫兹和马可尼发明天线以来,天线在人类的社会生活中发挥着越来越重要的作用。天线是发射和接收电磁波的一个重要的无线电设备,是无线通信系统中重要的一环,天线的性能将直接影响到通信系统的品质。

天线辐射的原理如图 1.1 所示。当导线上有交变电流通过时,就可以发生电磁波的辐射,辐射的能力与导线的长度和形状有关。若两条导线的距离很近,电场被束缚在两条导线之间,那么辐射很微弱。若将两条导线辐射的基本单元有电基本振子和磁基本振子,下面以电基本振子为例来讲解天线的辐射问题。

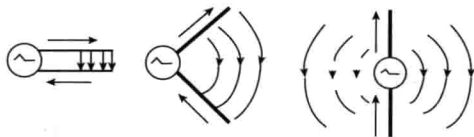


图 1.1 天线的辐射

1.1 电基本振子的辐射场

电基本振子又称电流元或者电偶极子,它是一段高频电流直导线,其长度 $dl \ll \lambda$, 其截面半径 $a \ll dl$, 导线上的电流处处幅同相。用这样的电基本振子可以组成实际的复杂天线,所以电基本振子的辐射特性是研究复杂天线辐射特性的基础。

根据电流连续性原理,在电基本振子两端将同时积存大小相等、符号相反的时变电荷。将电基本振子的中心放置于球坐标系的坐标原点,并使长度 dl 沿着 z 轴方向,如图 1.1.1 所示。

电基本振子上的电流大小使用 I 表示,则矢量位 \mathbf{A} 可以表示为:

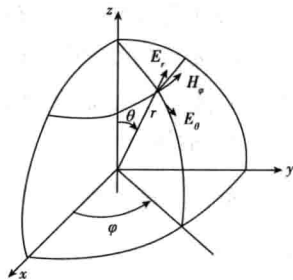


图 1.1.1 电基本振子的辐射场

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{J e^{-jkr}}{r} dv = \mathbf{e}_z \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r} e^{-jkr} \quad (1-1-1)$$

在球坐标系中

$$\mathbf{A} = \mathbf{e}_r A_r + \mathbf{e}_\theta A_\theta \quad (1-1-2)$$

$$\left. \begin{aligned} A_r &= A_z \cos\theta = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r} \cos\theta e^{-jkr} \\ A_\theta &= -A_z \sin\theta = -\frac{\mu_0 I dl}{4\pi r} \sin\theta e^{-jkr} \\ A_\phi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1-3)$$

于是, 可以求得辐射的磁场强度为:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A} = \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{r^2 \sin\theta} \begin{vmatrix} \mathbf{e}_r & r\mathbf{e}_\theta & r\sin\theta\mathbf{e}_\varphi \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial \varphi} \\ A_r & rA_\theta & 0 \end{vmatrix} \quad (1-1-4)$$

即

$$\left. \begin{aligned} H_r &= 0 \\ H_\theta &= 0 \\ H_\varphi &= \frac{1}{\mu_0 r} \left[\frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial(A_r)}{\partial \theta} \right] = j \frac{Idl}{2\lambda r} \sin\theta \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{-jkr} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-5)$$

再利用麦克斯韦方程, 可以求得电场强度为:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla \times \mathbf{H} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \frac{1}{r^2 \sin\theta} \begin{vmatrix} \mathbf{e}_r & r\mathbf{e}_\theta & r\sin\theta\mathbf{e}_\varphi \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial \varphi} \\ 0 & 0 & r^2 H_\varphi \sin\theta \end{vmatrix} \quad (1-1-6)$$

即:

$$\left. \begin{aligned} E_r &= j \frac{Idl}{2\pi r^2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cos\theta \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{-jkr} \\ E_\theta &= j \frac{Idl}{2\lambda r} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sin\theta \left(1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{k^2 r^2} \right) e^{-jkr} \\ E_\varphi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1-7)$$

式中, \mathbf{E} 为电场强度, 单位为 V/m; \mathbf{H} 为磁场强度, 单位为 A/m; 下标 r 、 θ 、 φ 分别表示球坐标系的各个方向分量; ϵ_0 为自由空间的介电常数, $\epsilon_0 = 1 \times 10^{-9}/36\pi$, 单位为 F/m; μ_0 为自由空间导磁率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, 单位为 H/m; k 是自由空间相位常数, $k = 2\pi/\lambda = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$, λ 是自由空间波长。

1. 近区场

$kr \ll 1$ 的区域称为近区, 此时 $\frac{1}{kr} \ll \frac{1}{(kr)^2} \ll \frac{1}{(kr)^3}$, $e^{-jkr} \approx 1$, 则式 (1-1-5) 和式 (1-1-7) 可以近似为:

$$\left. \begin{aligned} E_r &= -j \frac{2Idl \cos\theta}{4\pi\omega\epsilon_0 r^3} \\ E_\theta &= -j \frac{Idl \sin\theta}{4\pi\omega\epsilon_0 r^3} \\ H_\varphi &= \frac{Idl \sin\theta}{4\pi r^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-8)$$

由此可以看出, 近区电场和磁场存在 $\pi/2$ 的相位差, 于是坡印廷矢量的平均值为:

$$\mathbf{S}_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] = 0 \quad (1-1-9)$$

由于能量在电场和磁场以及场和源之间交换而没有能量辐射, 因此近区场也称为感应场。

2. 远区场

$kr \gg 1$ 的区域称为远区, 此时 $\frac{1}{kr} \gg \frac{1}{(kr)^2} \gg \frac{1}{(kr)^3}$, $e^{-jkr} \approx 1$, 则式 (1-1-5) 和式 (1-1-7) 可以近似为:

$$\left. \begin{aligned} E_{\theta} &= j \frac{Idl}{2\lambda r} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sin\theta e^{-jkr} \\ H_{\varphi} &= j \frac{Idl}{2\lambda r} \sin\theta e^{-jkr} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-10)$$

由此可以看出, 在远区内, 电场只有 E_{θ} 分量, 磁场只有 H_{φ} 分量, 且电场和磁场的相位相同。此时, 坡印廷矢量的平均值为:

$$\mathbf{S}_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] = \frac{1}{2} \text{Re}[E_{\theta} H_{\varphi}^*] \mathbf{e}_r \quad (1-1-11)$$

由于电磁波沿着球坐标系的 r 方向向外辐射, 因此远区场也称为辐射场。

对于电基本振子的辐射场而言, 电场、磁场和传播方向三者相互垂直, 在传播方向上电场和磁场的分量为零, 故称为横电磁波, 即 TEM 波。而且, 电场分量 E_{θ} 和磁场分量 H_{φ} 的比值为常数, 我们将其称为媒质的波阻抗。对于自由空间而言, 媒质的波阻抗为:

$$\eta_0 = \frac{E_{\theta}}{H_{\varphi}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi\Omega \quad (1-1-12)$$

1.2 参考天线的性能参数

要进入天线设计领域, 首先必须了解表征天线的基本性能参数, 如方向图、辐射强度、方向性系数、效率、增益、输入阻抗和天线的极化等。下面就来向读者简单地介绍一下表征天线的主要性能参数及其定义。

天线的辐射场在固定距离上随球坐标系的角坐标 (θ, φ) 分布的图形被称为天线的辐射方向图或辐射波瓣图, 简称方向图。方向图通常是在远区确定的。用辐射场强表示的方向图称为场强方向图, 用辐射功率密度表示的方向图称为功率方向图, 用相位表示的方向图称为相位方向图。方向图习惯上采用极坐标绘制, 角度表示方向, 矢径长度表示场强值或功率密度值。

1.2.1 方向图

完整的天线方向图应该用如图 1.2.1 所示的球坐标系下的三维立体方向图来表示, 但在计算机辅助设计普及之前, 三维空间的立体方向图绘制复杂, 工程上常用包含主瓣轴的剖面图来表示。此时, 方向图的表示一般需要用两个相互垂直的剖面, 我们将其称为主平面方向图, 如图 1.2.1 中的 xz 面和 yz 面。图 1.2.2 (a) 和图 1.2.2 (b) 所示为极坐标系中电场和功率的主平面方向图, 图 1.2.2 (c) 是将图 1.2.2 (a) 的主平面方向图改成在直角坐标系中用对数 (或 dB) 刻度表示, 这样能够更详细地给出旁瓣电平。

按半功率电平点夹角定义的波束宽度称为半功率波束宽度 (HPBW) 或者 -3dB 波束宽度; 按主瓣两侧第一个零点夹角定义的波束宽度称为第一零点波束宽度 (FNBW), 如图 1.2.2 所示。这两

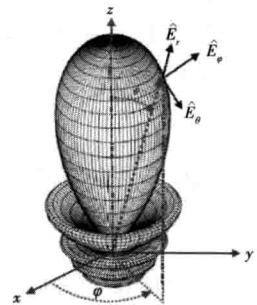


图 1.2.1 三维场方向图

种波束宽度都是重要的方向图参数。

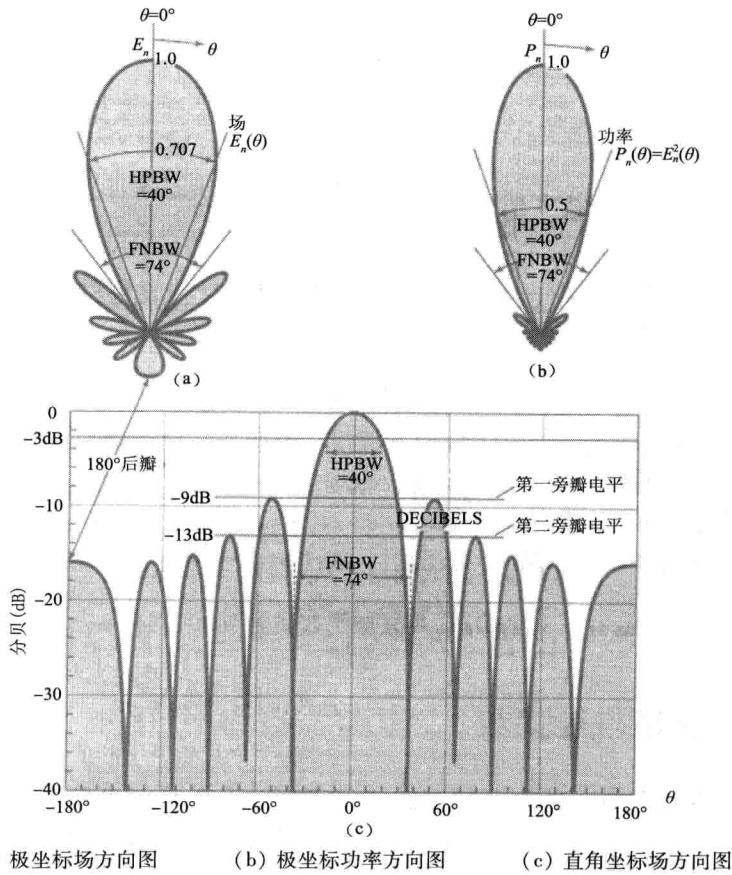


图 1.2.2 主平面方向图

1.2.2 辐射强度

每单位立体角内由天线辐射出的功率称为辐射强度 U ，单位为 W/Sr （瓦/立方弧度）。辐射强度可以由下式定义：

$$U(\theta, \varphi) = S(r, \theta, \varphi)r^2 \quad (1-2-1)$$

可见，与坡印廷幅值 S 反比于距离的平方不同，辐射强度 U 与距离无关。

1.2.3 方向性系数

天线的方向性系数 D 是指在远区场的某一球面上天线的辐射强度与平均辐射强度之比，即：

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_0} \quad (1-2-2)$$

式中，平均辐射强度 U_0 实际上是辐射功率除以球面积，即：

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi \quad (1-2-3)$$

通常所说的方向性系数指的都是最大辐射方向上的方向性系数，即：

$$D = \frac{U_{\max}}{U_0} \quad (1-2-4)$$

1.2.4 效率

由于天线系统中存在导体损耗、介质损耗等，因此实际辐射到空间内的电磁波功率要比发射机输送到天线的功率小。天线效率就是表征天线将输入高频能量转换为无线电能量的有效程度，定义为天线辐射功率和输入功率的比值。假设分别用 P_{in} 和 P_{rad} 表示天线的输入功率和辐射功率，则天线效率为：

$$\eta_A = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{in}}} \quad (1-2-5)$$

1.2.5 增益

方向性系数是以辐射功率为基点的，没有考虑天线将输入功率转换为辐射功率的效率，为了更完整地描述天线特性，特以天线的输入功率为基点定义了一个增益。天线增益是表征将输入给它的功率按特定方向辐射的能力，定义为在相同输入功率、相同距离的条件下，天线在最大辐射方向上的功率密度与无方向性天线在该方向上的辐射功率密度的比值。设该天线和无方向性天线的输入功率分别为 P_{in} 和 $P_{\text{in}0}$ ，且 $P_{\text{in}} = P_{\text{in}0}$ ，则该天线的增益 G 可以由下式计算：

$$G = S_{\text{max}}/S_0 \quad (1-2-6)$$

对比式 (1-2-1)、(1-2-4)、(1-2-5) 和式 (1-2-6)，且考虑到 $P_{\text{in}} = P_{\text{in}0}$ ，可以得到：

$$G = \eta_A D \quad (1-2-7)$$

1.2.6 输入阻抗

天线一般都是通过馈线和发射机相连的，天线和馈线的连接处称为天线的输入端，天线输入端呈现的阻抗值定义为天线的输入阻抗。

天线作为发射机的负载，它把从发射机得到的功率辐射到空间。这就有一个天线与馈线阻抗匹配的问题，阻抗匹配的程度将直接影响功率传输的效率。在射频微波频段，馈线通常是使用 50Ω 标准阻抗。所以在设计天线时，需要尽可能地把天线的输入阻抗设计在 50Ω ，在工作频带内保证尽可能小的驻波比。

天线的输入阻抗取决于天线的结构、工作频率和周围环境的影响，仅在极少数情况下可以用理论严格计算。工程中通常采用近似计算或者用实验方法测量。

1.2.7 天线的极化

天线的极化通常是指天线辐射电磁波的电场的方向，即时变电场矢量端点运动轨迹的形状、取向和旋转方向。根据电场矢量端点轨迹呈直线、椭圆和圆形等不同形状，天线极化可以分为线极化、椭圆极化和圆极化，如图 1.2.3 所示；对于椭圆极化和圆极化而言，根据其旋转方向的不同，又可分为左旋极化和右旋极化两种类型。

考察由页面向外（沿 z 轴方向）行进的平面波，一般而言，电场同时有 x 分量和 y 分量，在确定的 z 点处电场矢量 \mathbf{E} 作为时间的函数而旋转，若其端点轨迹为椭圆，则称为椭圆极化波，如图 1.2.3 (b) 所示。椭圆极化有两种极端情况，一是电场只有 x 分量或者只有 y 分量，此时电场始终沿着 x 轴方向或者 y 轴方向，我们将其称为线极化，如图 1.2.3 (a) 所示；二是电场 x 分量和 y 分量相等，此时称为圆极化，如图 1.2.3 (c) 所示。

对于任意方向的椭圆极化波，可以分别用沿 x 轴方向和 y 轴方向的两项线极化分量来描述，如图 1.2.4 所示。如果波沿着 z 轴方向（即垂直于纸面向外）行进，则 x 轴方向和 y

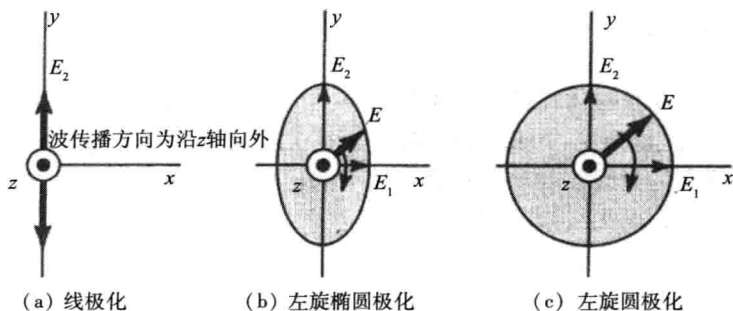


图 1.2.3 天线的极化

轴方向的电场分量分别为:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_1 \sin(\omega t - \beta z) \\ E_y &= E_2 \sin(\omega t - \beta z + \delta) \end{aligned} \right\} \quad (1-2-8)$$

式中, E_1 为沿 x 轴方向的线极化波幅度, E_2 为沿 y 轴方向的线极化波幅度, δ 为 E_y 滞后于 E_x 的相位角。

在 $z=0$ 处, 有:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_1 \sin \omega t \\ E_y &= E_2 \sin(\omega t + \delta) = E_2 (\sin \omega t \cos \delta + \cos \omega t \sin \delta) \end{aligned} \right\} \quad (1-2-9)$$

式 (1-2-9) 消去 ωt , 再经整理可得:

$$\frac{E_x^2}{E_1^2} - \frac{2E_x E_y \cos \delta}{E_1 E_2} + \frac{E_y^2}{E_2^2} = \sin^2 \delta \quad (1-2-10)$$

式 (1-2-10) 描述了如图 1.2.4 所示的极化椭圆。

若 $E_1=0$, 则波是沿 y 轴方向极化的; 若 $E_2=0$, 则波是沿 x 轴方向极化的。若 $\delta=0$ 且 $E_1=E_2$, 则波是在如图 1.2.4 所示的 OA 轴方向上线极化的。

若 $E_1=E_2$ 且 $\delta=\pm 90^\circ$, 则波是圆极化的。当 $\delta=+90^\circ$ 时, 波是左旋圆极化的; 当 $\delta=-90^\circ$ 时, 波是右旋圆极化的。

轴比 (Axial Ratio) 是一个表征天线极化的参数, 其定义为极化椭圆的长轴和短轴的比值。对于线极化波, 轴比为无穷大; 对于圆极化波, 轴比等于 1。

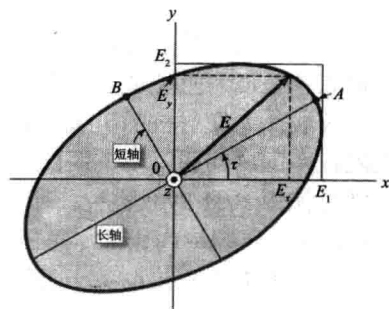


图 1.2.4 极化椭圆

1.3 本章小结

本章主要讲述天线的基础知识, 其中, 1.1 节分析了电基本振子的辐射场, 1.2 节详细说明了天线各项性能参数的定义。通过本章的学习, 读者可以更好地理解和掌握后续章节中的天线设计分析实践。

第 2 章

HFSS 天线设计流程

HFSS 是美国 Ansoft 公司（注：Ansoft 公司于 2008 年被 Ansys 公司收购）开发的全波三维电磁仿真软件。该软件采用有限元法，计算结果准确可靠，是业界公认的三维电磁场设计和分析的工业标准。

HFSS 采用标准的 Windows 图形用户界面，简洁直观；自动化的设计流程，易学易用；稳定成熟的自适应网格剖分技术，结果准确。使用 HFSS，用户只需要创建或导入设计模型，指定模型材料属性，正确分配模型的边界条件和激励，准确定义求解设置，软件便可以计算并输出用户需要的设计结果。

作为一款功能强大的三维电磁设计软件，HFSS 可以为天线设计提供全面的解决方案。使用 HFSS 可以仿真分析和优化设计各类天线，精确计算天线的各种性能，包括二维、三维远场和近场辐射方向图、天线的方向性系数、增益、轴比、半功率波瓣宽度、输入阻抗、电压驻波比、S 参数以及电流分布特性等。

本章首先就 HFSS 天线设计的流程做一个简要的概述，然后对 HFSS 天线设计过程中每个设计步骤的相关设置和具体操作进行详细的介绍。

2.1 HFSS 天线设计流程概述

使用 HFSS 软件进行天线设计的设计流程如图 2.1.1 所示，设计流程中各个步骤的功能分述如下。

① 设置求解类型。使用 HFSS 进行天线设计时，可以选择模式驱动（Driven Modal）求解类型或者终端驱动（Driven Terminal）求解类型。

② 创建天线的结构模型。根据天线的初始尺寸和结构，在 HFSS 模型窗口中创建出天线的 HFSS 参数化设计模型。另外，HFSS 也可以直接导入由 AutoCAD、Pro/E 等第三方软件创建的结构模型。

③ 设置边界条件。在 HFSS 中，与背景相接触的表面都被默认设置为理想导体边界（Perfect E）；为了模拟无限大的自由空间，在使用 HFSS 进行天线设计时，必须把与背景相接触的表面设置为辐射边界条件或者理想匹配层（PML）边界条件，这样 HFSS 才会计算天线的远区辐射场。

④ 设置激励方式。天线必须通过传输线或者波导传输信号，天线与传输线或者波导的连接处即为馈电面或者称为激励端口。天线设计中馈电面的激励方式主要有两种，分别是波端口激励（Wave Port）和集总端口激励（Lumped Port）。通常，与背景相接触的馈电面的激励方式使用波端口激励，在模型内部的馈电面的激励方式使用集总端口激励。

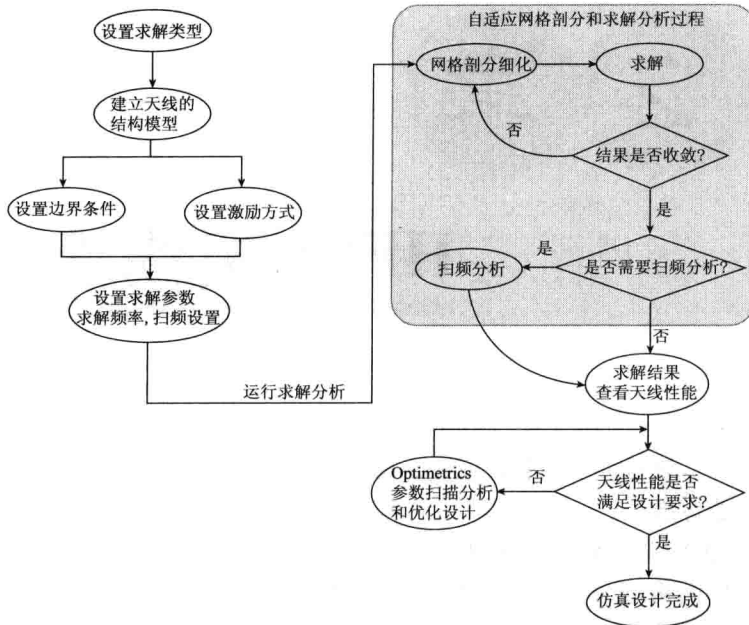


图 2.1.1 HFSS 天线设计流程

⑤ 设置求解参数，包括设定求解频率和扫频参数，其中，求解频率通常设定为天线的中心工作频率。

⑥ 运行求解分析。上述操作完成后，即创建好天线模型，正确设置了边界条件、激励方式和求解参数，即可执行求解分析操作命令来运行仿真计算。整个仿真计算由 HFSS 软件自动完成，不需要用户干预。分析完成后，如果结果不收敛，则需要重新设置求解参数；如果结果收敛，则说明计算结果达到了设定的精度要求。

⑦ 查看求解结果。求解分析完成后，在数据后处理部分可以查看 HFSS 分析出的天线的各项性能参数，如回波损耗 S_{11} 、电压驻波比 VSWR、输入阻抗、天线方向图、轴比和电流分布等。如果仿真计算的天线性能满足设计要求，那么就完成了天线的仿真设计工作，接下来可以着手天线的制作和调试工作。如果仿真计算的天线性能未能达到设计要求，那么还需要使用 HFSS 的参数扫描分析功能或者优化设计功能，进行参数扫描分析和优化设计。

⑧ Optimetrics 优化设计。如果前面的分析结果未达到设计要求，那么还需要使用 Optimetrics 模块的参数扫描分析功能和优化设计功能来优化天线的结构尺寸，以找到满足要求的天线设计。

2.2 HFSS 天线设计详细操作

2.2.1 求解类型

HFSS 中共有三种求解类型，分别是模式驱动求解 (Driven Modal)、终端驱动求解 (Driven Terminal) 和本征模式求解 (Eigenmode)。在天线设计中，通常选择模式驱动或者终端驱动求解类型。其中，模式驱动求解类型是根据导波模式的入射和反射功率来计算 S 参数矩阵的解，终端驱动求解类型是根据传输线终端的电压和电流来计算 S 参数矩阵的解。

通过选择【HFSS】→【Solution Type】命令，可以打开如图 2.2.1 所示的对话框，设定设计的求解类型。

2.2.2 创建天线结构模型

HFSS 软件提供了一个简单易用的建模环境，从而可以准确、方便地创建出各种天线的结构模型，包括准确地设置天线模型的结构尺寸和正确地分配模型的材料。

在 HFSS 中也可以导入由第三方软件创建的结构模型。通过选择主菜单栏中的【Modeler】→【Import】命令，可以导入由 AutoCAD、Pro/E 等软件创建的天线结构模型。

另外，为了方便后续的参数扫描分析和优化设计，以及为了能够方便地更改设计模型的结构尺寸，在建模时可以定义一系列的变量来表示模型的物理尺寸。

2.2.3 设置边界条件

边界条件确定场，正确地设置边界条件是正确使用 HFSS、仿真计算出准确结果的前提。而且，灵活地使用边界条件还可以很好地降低模型的复杂度。

在 HFSS 设计中，设置边界条件的步骤为：首先选中物体表面，然后在三维模型窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Assign Boundary】命令，即可弹出设置边界条件的级联菜单，如图 2.2.2 所示，单击级联菜单中的边界条件名称，即可打开相应边界条件的设置对话框，给选中的物体表面分配该边界条件。

HFSS 中定义了多种边界条件类型，分别为理想导体边界条件（Perfect E）、理想磁边界条件（Perfect H）、有限导体边界条件（Finite Conductivity）、辐射边界条件（Radiation）、对称边界条件（Symmetry）、阻抗边界条件（Impedance）、集总 RLC 边界条件（Lumped RLC）、无限地平面（Infinite Ground Plane）、主从边界条件（Master and Slave）、理想匹配层（PML）和分层阻抗边界条件（Layered Impedance）。天线设计中，最常用到的边界条件是理想导体边界条件（Perfect E）、有限导体边界条件（Finite Conductivity）、辐射边界条件（Radiation）和理想匹配层（PML）。

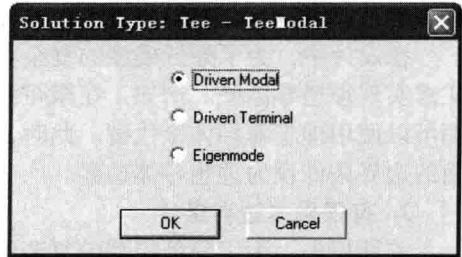


图 2.2.1 求解类型

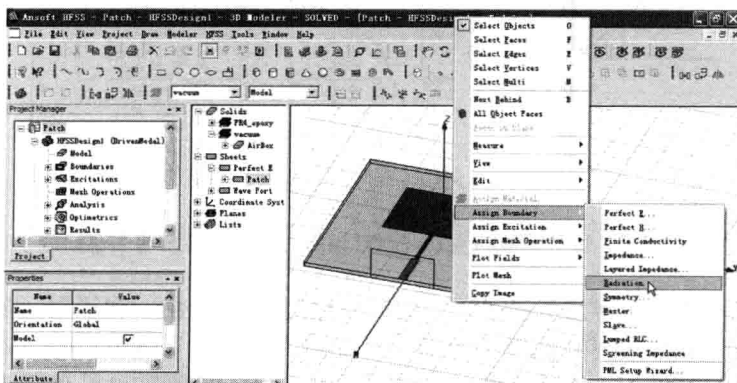


图 2.2.2 设置边界条件

1. 理想导体边界条件

在 HFSS 中，任何与背景相关联的物体表面以及材质为理想电导体（pec）的物体表面