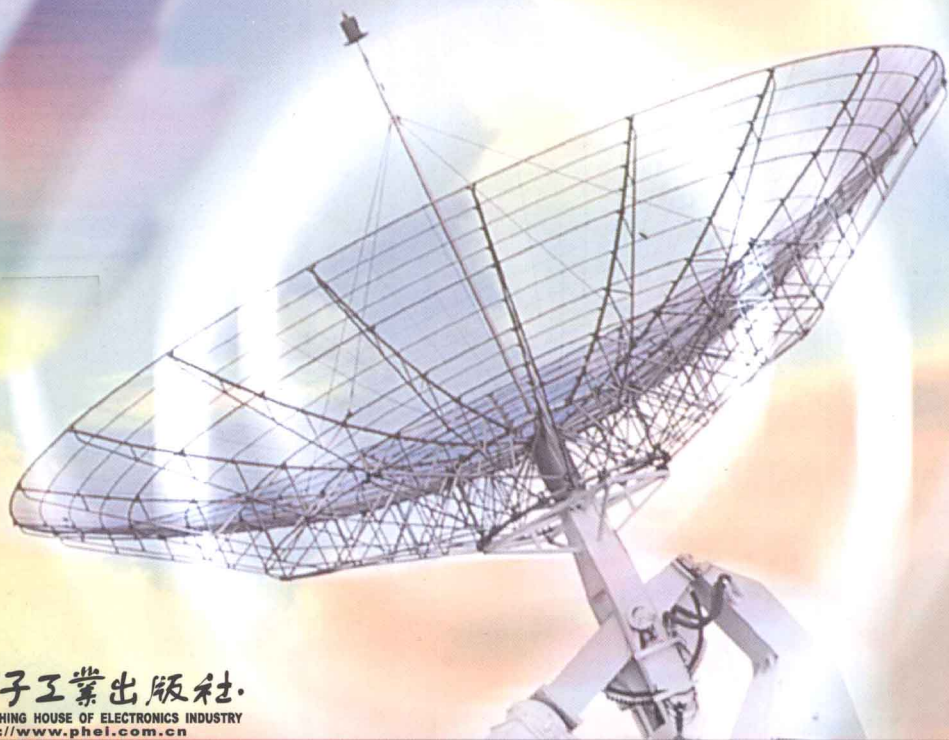


Broadview[®]
www.broadview.com.cn

HFSS 天线设计

李明洋 刘敏 杨放 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

HFSS 天线设计

李明洋 刘敏 杨放 编著

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

内 容 简 介

本书主要介绍了天线设计的理念以及如何使用 HFSS 仿真软件来仿真设计各类天线,包括微带天线、极子天线、喇叭天线、PIFA 天线等。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。相信立志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、天线设计领域从事研究和开发工作的工程科技人员参考,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,杨放编著. —北京:电子工业出版社,2011.8
ISBN 978-7-121-14033-4

I. ①H… II. ①李…②刘…③杨… III. ①天线设计—计算机仿真—应用软件, HFSS IV. ①TN82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 132412 号

责任编辑:刘 舫

特约编辑:孙佳志

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司
装 订:

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:21.5 字数:550 千字

印 次:2011 年 8 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:48.00 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，包括二维和三维远场/近场辐射方向图、天线增益、轴比、半功率波瓣宽度、内部电磁场分布、天线阻抗、电压驻波比以及 S 参数等。HFSS 软件可以帮助工程师高效地设计出各种类型的天线，从而有效地降低设计成本，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 天线等多种不同类型天线的 HFSS 仿真分析方法和设计工程实践。书中所用 HFSS 软件版本为 12.0。

全书共分 8 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 章首先简要介绍了使用 HFSS 软件进行天线设计的基本流程，然后详细介绍了 HFSS 天线设计流程中每个设计步骤的具体操作和设置。第 3 章~第 7 章是 HFSS 天线设计的工程实践部分，介绍了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 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天线结构，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 GSM 900 频段的单频 PIFA 天线

和一款工作于 GSM 900/DCS 1800 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。在本书的最后，第 8 章介绍了 HFSS 的天线辅助设计工具——Antenna Design Kit 的使用。

本书特点

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，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，还要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，让天线设计不再难。

- 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，然后再讲解 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，以方便读者在后续学习中更改天线结构尺寸。

技术支持网站

由于作者水平有限，书中难免有疏漏和不足之处，敬请读者批评指正。为此作者开通了技术支持网站，提供了与本书相关的学习资源、设计文件和最新勘误信息，网站的地址为 <http://www.edatop.com/hfss>。

“纸上得来终觉浅，绝知此事要躬行”，再好的教材也需要读者多读、多看、勤思考、多操作，才能真正理解并掌握其中的内容。为了尽可能地节约读者的学习时间，提高学习效率，作者还主讲了《两周学会 HFSS》、《HFSS 微波器件仿真设计实例》和《HFSS 天线设计基础》等多套视频多媒体课程。视频多媒体课程能够以更加直观、生动、高效的方式帮助读者在最短的时间内迅速掌握 HFSS 的设计应用。有关 HFSS 视频课程的详情，读者可以登录我们的技术支持网站进行查看。

作者的电子邮箱为 mingyang.li@yahoo.com.cn。

李明洋

优秀原创 · 经典作品集

《Windows 内核情景分析 ——采用开源代码ReactOS (上、下册)》

毛德操 著

定价: 190.00元

内容简介: 全书从“内存管理”、“进程”、“进程间通信”、“设备驱动”等多个方面进行分析介绍,所有的分析都有 ReactOS 的源代码(以及部分由微软公开的源代码)作为依据,使读者能深入理解 Windows 内核的方方面面,也可以使读者的软件开发能力和水平得到提高。



《构建高性能Web站点》

郭欣 著

定价: 59.00元

内容简介: 本书围绕如何构建高性能 Web 站点,从多个方面、多个角度进行了全面的阐述,涵盖了 Web 站点性能优化的几乎所有内容,包括数据的网络传输、服务器并发处理能力、Web 服务器缓存、反向代理缓存、脚本解释速度、页面组件分离、浏览器本地缓存等。



《天书夜读: 从汇编语言到Windows内核编程》

谭文 邵坚磊 著

定价: 45.00元

内容简介: 本书从基本的 Windows 程序与汇编指令出发,深入浅出地讲解了 Windows 内核的编程、调试、阅读,以及自行探索的方法。读者在使用 C/C++ 开发 Windows 程序的基础上,将熟练掌握汇编和 C 语言的应用,深入了解 Windows 底层,并掌握阅读 Windows 内核的基本方法,以及 Windows 内核的基本编程方法。



《软件架构的艺术》

李伟 吴庆海 著

定价: 59.00元

内容简介: 本书聚焦于软件架构行业,全面介绍软件应用系统架构的基本原理、方法以及经典的实践经验。把握共同的规律,预知未来的发展,选择最佳的路径,尽可能减少成长的烦恼,并保持成熟的稳定,让企业充分享受属于架构整个生命阶段的华彩!



《Orange'S: 一个操作系统的实现》

于渊 著

定价: 69.00元(含光盘1张)

内容简介: 本书从只有二十行的引导扇区代码出发,一步一步地向读者呈现一个操作系统框架的完成过程。书中不仅关注代码本身,同时关注完成这些代码的思路和过程。本书不同于其他的理论型书籍,而是提供给读者一个动手实践的路线图。



《嵌入式系统Linux内核开发实战指南(ARM平台)》

王洪辉 编著

定价: 168.00元(配光盘1张)

内容简介: 《嵌入式系统 Linux 开发实战指南(ARM 平台)》凝聚了作者 12 年的工作经验和学习心得与体会,内容覆盖了嵌入式系统 Linux 内核开发的各个方面。该书共 32 章,分为四部分,每一部分的内容既相互独立,又彼此关联,读者可以根据自己的实际情况有选择地阅读,不必严格依照书中的章节顺序。



《Windows驱动开发技术详解》

张帆 史彩成 等编著

定价: 65.00元(含光盘1张)

内容简介: 本书由浅入深、循序渐进地介绍了 Windows 驱动程序的开发方法与调试技巧。本书共分 23 章,内容涵盖了 Windows 操作系统的基本原理、NT 驱动程序与 WDM 驱动程序的构造、驱动程序中的同步异步处理方法、驱动程序中即插即用功能、驱动程序的各种调试技巧等。



《轻量级Java EE企业应用实战 ——Struts 2+Spring+Hibernate整合开发》

新东方IT培训广州中心 软件教学总监 李刚著

定价: 89.00元

内容简介: 本书介绍了 Java EE 领域的三个开源框架: Struts 2、Spring 和 Hibernate。其中 Struts 2 升级到 2.1.2, Spring 升级到 2.5.5, Hibernate 升级到 3.2.6。本书保留《轻量级 J2EE 企业应用实战》里关于 Tomcat、Jetty 的介绍,新增了关于 Ant、CVS 的内容。



《Oracle数据库精讲与疑难解析》

Oracle DBA 赵振平 编著

定价: 128.00元

内容简介: 本书分为三个部分,共 18 章,由浅入深地详细介绍了 Oracle 的每个开发细节。本书基础翔实,实例丰富,案例真实。从基础到案例覆盖了 Oracle 应用开发的三大领域: 基础应用、网络应用和游戏应用。读者所需要学习的,正是本书描述的。



《VC++深入详解》

孙鑫 余安萍 编著

定价: 89.00元

内容简介: 本书从实际应用入手,由浅入深、循序渐进地讲述 Windows 程序内部运行机制、MFC 框架、文本、菜单、对话框、文件操作、网络编程、进程间通信、ActiveX 控件、动态链接库、HOOK 编程等多个主题。本书内容丰富、实用性强,许多代码可以直接应用到工程项目中。



欢迎投稿:

投稿信箱: jsj@phei.com.cn
editor@broadview.com.cn

读者信箱: market@broadview.com.cn

电话: 010-51260888

更多信息请关注:

博文视点官方网站:
http://www.broadview.com.cn

博文视点官方微博:
http://t.sina.com.cn/broadviewbj

外版典藏 · 经典作品集



《程序开发心理学（银年纪念版）》

【美】Gerald M. Weinberg 著 韩江译
定价：69.00元
内容简介：本书出自软件领域著名思想家，美国计算机名人堂首批成员之一的 Gerald M. Weinberg 温伯格之手。本书关注的是程序开发过程中人的因素，堪称这一领域的开山之作。本书的初稿完成于整整 40 年前，作者当时慧眼独具，前瞻性地提出了将程序开发作为一种人类行为来考察的观点。



《Effective C++：改善程序与设计的 55 个具体做法：第3版》

【美】Scott Meyers（斯科特·梅耶）著 侯捷译
定价：65.00元
内容简介：在国际上，本书所引起的反响，波及整个计算机技术的出版领域，余音至今未绝。几乎在所有 C++ 书籍的推荐名单上，本书都会位于前三名。作者高超的技术把握力、独特的视角、诙谐轻松的写作风格、独具匠心的内容组织，都受到极大的推崇和仿效。



《技术领导之路：全面解决问题的途径》

【美】Gerald M. Weinberg 著 余晟译
定价：69.00元
内容简介：本书将帮助你成为一个成功的解决问题的领导者。书中温伯格从一个反思者的角度阐述了要成为一个成功的解决问题的领导者必备的 3 个技能——MOI，即激励（Motivation）、组织（Organization）和创新（Innovation）。



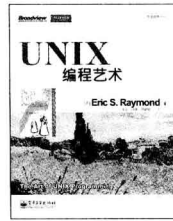
《程序员修炼之道：从小工到专家》

【美】Andrew Hunt David Thomas 著 马维达译
定价：55.00元
内容简介：《程序员修炼之道》由一系列独立的部分组成，涵盖的主题从个人责任、职业发展，直到用于使代码保持灵活、并且易于改编和复用的各种架构技术，利用许多富有娱乐性的奇闻轶事、有思想性的例子及有趣的类比，全面阐释了软件开发的许多不同方面的最佳实践和重大陷阱。



《完美软件——对软件测试的各种幻想》

【美】Gerald M. Weinberg 著 宋锐译
定价：55.00元
内容简介：本书是从事软件行业五十余年的 Gerald M. Weinberg 针对软件测试所写的新作。他在软件项目的管理、设计、开发和测试方面都具有极其丰富的经验，对于与软件开发有关人员的心理尤其有深入的研究。



《UNIX编程艺术》

【美】Eric S. Raymond（埃瑞克·S·理曼德）著；姜宏 何源 蔡晓波 译
定价：69.00元
内容简介：本书主要介绍了 Unix 系统领域中的设计和开发哲学、思想文化体系、原则与经验，由公认的 Unix 编程大师、开源运动领袖人物之一 Eric S. Raymond 倾力多年写作而成。包括 Unix 设计者在内的多位领域专家也为本书贡献了宝贵的内容。



《编码：隐匿在计算机软硬件背后的语言》

【美】Charles Petzold 著 左飞 薛冬译
定价：55.00元
内容简介：这是一本讲述计算机工作原理的书。不过，你千万不要因为“工作原理”之类的字眼就武断地认为，它是晦涩而难懂的。作者用丰富的想象和清晰的笔墨将看似繁杂的理论阐述得通俗易懂，你丝毫不会感到枯燥和生硬。



《海量数据库解决方案》

【韩】李华植 著 郑保卫 盖国强 译
定价：69.00元
内容简介：《海量数据库解决方案》系列丛书深受广大读者的喜爱已经长达 10 年之久，在被誉为“圣经”的同时，它已经变成了数据库用户不可或缺的一本必读书籍。作者竭力探求能够让 IT 工作者在实际工作中轻松应用并掌控的巧妙方法，提供事半功倍的海量数据库解决方案。



《黑客反汇编揭秘：第二版》

【俄】Kris Kaspersky（克里斯·卡巴斯基）著 谭明金等译
定价：65.00元
内容简介：很多人认为，黑客行为（Hacking）是不道德的，而本书作者 Kris Kaspersky 认为，这本书既不是一本破解代码的技术手册，也不是一本关于反黑客的防护手册，本书可以看作是一位喜欢刨根问底的自由主义者的学习笔记。



《代码大全（第2版）》

【美】Steve McConnell（史蒂夫·迈克康奈尔）著 金戈 汤凌 陈硕 张菲 译
定价：98.00元
内容简介：这也是一本完整的软件构建手册，涵盖了软件构建过程中的所有细节。它从软件质量和编程思想等方面论述了软件构建的各个方面，并详细论述了紧跟潮流的新技术、高层建筑的观点、通用的概念，还含有丰富而典型的程序示例。

欢迎投稿：

投稿邮箱：jsj@phei.com.cn
editor@broadview.com.cn
读者信箱：market@broadview.com.cn
电话：010-51260888

更多信息请关注：

博文视点官方网站：
http://www.broadview.com.cn
博文视点官方微博：
http://t.sina.com.cn/broadviewbj

《HFSS 天线设计》读者交流区

尊敬的读者：

感谢您选择我们出版的图书，您的支持与信任是我们持续上升的动力。为了使您能通过本书更透彻地了解相关领域，更深入的学习相关技术，我们将特别为您提供一系列后续的服务，包括：

1. 提供本书的修订和升级内容、相关配套资料；
2. 本书作者的见面会信息或网络视频的沟通活动；
3. 相关领域的培训优惠等。

您可以任意选择以下四种方式之一与我们联系，我们都将记录和保存您的信息，并给您提供不定期的信息反馈。

1. 在线提交

登录 www.broadview.com.cn/14033，填写本书的读者调查表。

2. 电子邮件

您可以发邮件至 jsj@phei.com.cn 或 editor@broadview.com.cn。

3. 读者电话

您可以直接拨打我们的读者服务电话：**010-88254369**。

4. 信件

您可以写信至如下地址：北京万寿路173信箱博文视点，邮编：**100036**。

您还可以告诉我们更多有关您个人的情况，及您对本书的意见、评论等，内容可以包括：

- (1) 您的姓名、职业、您关注的领域、您的电话、E-mail地址或通信地址；
- (2) 您了解新书信息的途径、影响您购买图书的因素；
- (3) 您对本书的意见、您读过的同领域的图书、您还希望增加的图书、您希望参加的培训等。

如果您在后期想停止接收后续资讯，只需编写邮件“退订+需退订的邮箱地址”发送至邮箱：

market@broadview.com.cn 即可取消服务。

同时，我们非常欢迎您为本书撰写书评，将您的切身感受变成文字与广大书友共享。我们将挑选特别优秀的作品转载在我们的网站（www.broadview.com.cn）上，或推荐至CSDN.NET等专业网站上发表，被发表的书评的作者将获得价值50元的博文视点图书奖励。

更多信息，请关注博文视点官方微博：<http://t.sina.com.cn/broadviewbj>。


我们期待您的消息！

博文视点愿与所有爱书的人一起，共同学习，共同进步！

通信地址：北京万寿路 173 信箱 博文视点（100036）

电话：010-51260888

E-mail: jsj@phei.com.cn, editor@broadview.com.cn

 www.phei.com.cn
www.broadview.com.cn

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E - m a i l: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 天线基础	
1.1 电基本振子的辐射场	2
1.2 天线的性能参数	4
1.2.1 方向图	4
1.2.2 辐射强度	5
1.2.3 方向性系数	6
1.2.4 效率	6
1.2.5 增益	6
1.2.6 输入阻抗	6
1.2.7 天线的极化	7
1.3 本章小结	8
第 2 章 HFSS 天线设计流程	
2.1 HFSS 天线设计流程概述	9
2.2 HFSS 天线设计详细操作	11
2.2.1 求解类型	11
2.2.2 创建天线结构模型	11
2.2.3 设置边界条件	12
2.2.4 设置激励方式	15
2.2.5 设置求解参数	19
2.2.6 设计检查和运行求解分析	21
2.2.7 天线问题的数据后处理	22
2.2.8 Optimetrics 优化设计	22
2.3 本章小结	27
第 3 章 偶极子和单极子天线设计	
3.1 概述	28
3.1.1 半波偶极子天线	28
3.1.2 单极子天线	31

3.2	半波偶极子天线设计	32
3.2.1	HFSS 设计概述	32
3.2.2	HFSS 仿真设计	33
3.3	印刷偶极子天线设计	51
3.3.1	印刷偶极子天线的结构	51
3.3.2	天线初始尺寸和 HFSS 设计概述	52
3.3.3	HFSS 仿真设计	53
3.4	WLAN 双频单极子天线设计	75
3.4.1	双频单极子天线的结构	75
3.4.2	天线初始尺寸和 HFSS 设计概述	76
3.4.3	HFSS 仿真设计	77
3.5	本章小结	96
第 4 章 微带天线设计		
4.1	微带天线概述	97
4.1.1	微带天线的辐射机理	97
4.1.2	微带天线的馈电	98
4.1.3	矩形微带天线的特性参数	99
4.2	侧馈矩形微带天线设计	101
4.2.1	设计要求	101
4.2.2	设计步骤	101
4.2.3	HFSS 设计概述	102
4.2.4	HFSS 仿真设计	104
4.3	同轴馈电矩形微带天线设计	125
4.3.1	设计要求	125
4.3.2	初始设计	125
4.3.3	HFSS 设计概述	125
4.3.4	HFSS 仿真设计	126
4.4	双频微带天线设计	153
4.4.1	设计要求	153
4.4.2	HFSS 设计概述	154
4.4.3	HFSS 仿真设计	154
4.5	圆极化矩形微带天线设计	171
4.5.1	单点馈电圆极化微带天线实现原理	171
4.5.2	设计要求	172
4.5.3	设计步骤	172
4.5.4	HFSS 设计概述	172
4.5.5	HFSS 仿真设计	173
4.6	本章小结	192

第 5 章 倒 F 天线设计

- 5.1 倒 F 天线概述 194
 - 5.1.1 倒 F 天线的结构参数分析 194
 - 5.1.2 倒 F 天线的辐射特性 196
- 5.2 倒 F 天线的设计和分析 196
 - 5.2.1 倒 F 天线的模型结构 196
 - 5.2.2 HFSS 仿真设计过程 198
 - 5.2.3 分析倒 F 天线的结构参数对天线性能的影响 218
- 5.3 本章小结 226

第 6 章 平面倒 F 天线设计

- 6.1 PIFA 天线的基本原理 228
 - 6.1.1 PIFA 天线的基本结构和由来 228
 - 6.1.2 PIFA 天线的谐振频率 228
 - 6.1.3 PIFA 天线的带宽 230
 - 6.1.4 PIFA 天线的电场分布和电流分布 231
 - 6.1.5 PIFA 天线多频工作的实现 232
- 6.2 GSM 900 单频 PIFA 天线的设计和分析 234
 - 6.2.1 倒 F 天线的模型结构 234
 - 6.2.2 PIFA 天线的 HFSS 设计过程 236
 - 6.2.3 PIFA 天线的结构参数对天线性能的影响分析 266
 - 6.2.4 保存设计 270
- 6.3 GSM 900 和 DCS 1800 双频 PIFA 天线的设计 271
- 6.4 本章小结 280

第 7 章 喇叭天线设计

- 7.1 矩形口径喇叭天线设计 281
 - 7.1.1 矩形口径喇叭天线的理论 281
 - 7.1.2 设计要求和初始设计 283
 - 7.1.3 HFSS 仿真设计 284
- 7.2 圆形口径双模喇叭天线设计 304
 - 7.2.1 圆形口径喇叭天线原理 304
 - 7.2.2 双模圆锥喇叭 305
 - 7.2.3 设计实例分析 306
 - 7.2.4 HFSS 仿真设计 308
- 7.3 本章小结 323

第 8 章 HFSS Antenna Design Kit

- 8.1 安装和启动 325
 - 8.1.1 Antenna Design Kit 的安装 325
 - 8.1.2 Antenna Design Kit 的启动 325

8.1.3 在 HFSS 中集成 Antenna Design Kit	325
8.2 Antenna Design Kit 用户界面	326
8.2.1 菜单栏	327
8.2.2 天线类型	328
8.2.3 模型显示和参数设置区	329
8.3 Antenna Design Kit 应用实例	329
8.3.1 启动 Antenna Design Kit	330
8.3.2 设置介质基板	330
8.3.3 选择天线类型并自动创建设计模型	330
8.4 本章小结	332

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。若将两条导线张开，电场就散播在周围的空间内，那么辐射增强。需要指出的是，当导线的长度 L 远小于波长 λ 时，辐射很微弱；当导线的长度 L 增大到可与波长 λ 相比拟时，导线上的电流将大大增加，因而就能形成较强的辐射。

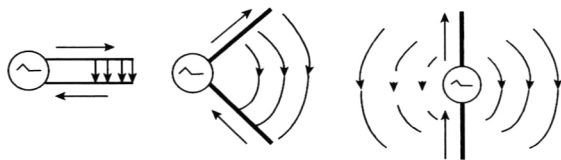


图 1.1 天线的辐射

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。

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 $a \ll dl$ ，导线上的电流处处等幅同相。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。

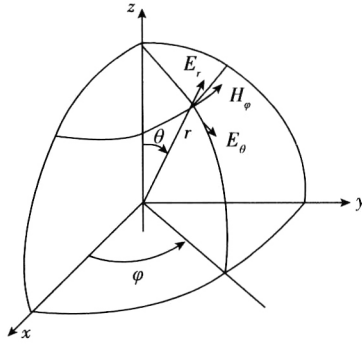


图 1.1.1 电基本振子的辐射场

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：

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

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：

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

即

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

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:

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

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 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。

1.2.1 方向图

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。

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到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。

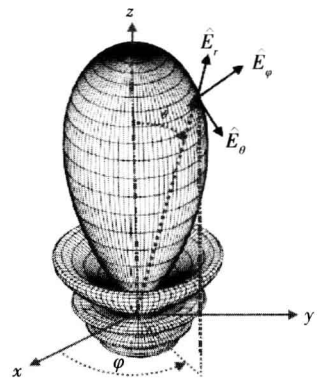


图 1.2.1 三维场方向图