



# Ansoft HFSS 基础及应用

谢拥军 王 鹏 编著  
李 磊 周建华 雷振亚

西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

## 内 容 简 介

Ansoft HFSS 是基于电磁场有限元方法的分析微波工程问题的三维电磁仿真软件。全书围绕该软件的应用理论基础和实际应用展开介绍,共分 5 章。第 1 章介绍微波射频技术的基本理论和基础知识;第 2 章讲述电磁场有限元方法的基本原理;第 3 章对软件的界面和使用方法作了简单介绍;第 4 章详细给出了 Ansoft HFSS 的计算原理与技术细则;第 5 章通过大量的工程实例来帮助读者熟悉 Ansoft HFSS 软件并掌握其应用方法。在学习完本书内容后,读者即可对于实际工程问题给出正确的仿真解决方案。

本书取材广泛,内容新颖,系统性强,可作为高等院校、科研院所、公司中从事射频微波工程设计和研究的科技工作者的应用手册,也可作为高校相关专业研究生和本科生的科研教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

Ansoft HFSS 基础及应用/谢拥军等编著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2007. 8

ISBN 978-7-5606-1847-0

I. A… II. 谢… III. 宽带通信系统 IV. TN914.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 093191 号

策 划 马乐惠

责任编辑 邵汉平 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 14.875

字 数 350 千字

印 数 1~4 000 册

定 价 19.00 元

ISBN 978-7-5606-1847-0/TN·0376

**XDUP 2139001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

# 前 言

近年来,微波技术得到了广泛的应用,其现代应用包括无线通信系统、雷达系统、卫星通信系统、射频识别以及微波环境遥感系统。因此,微波工程方面涌现出了许多具有挑战性的课题。然而,微波工程中的分析设计工作是非常复杂的,经典分析方法往往存在很多近似,无法得到精确的结果,这使得设计工作通常需要经过反复的设计、加工、调试过程才能得到令人满意的结果。这样的一个设计周期往往很长,难以在当今日趋激烈的竞争中占有优势。因此,用以简化设计过程的电子设计自动化(EDA)软件应运而生,在现今的微波工程设计中,EDA软件具有无法替代的地位和作用。

Ansoft HFSS 是 Ansoft 公司推出的基于电磁场有限元方法(FEM)的分析微波工程问题的三维电磁仿真软件。Ansoft HFSS 以其无以伦比的仿真精度和可靠性,快捷的仿真速度,方便易用的操作界面,稳定成熟的自适应网格剖分技术,使其成为高频结构设计的首选工具和行业标准,并已广泛应用于航空、航天、电子、半导体、计算机、通信等多个领域,帮助工程师们高效地设计了各种高频结构。但是,国内尚无全面系统介绍 Ansoft HFSS 软件的使用以及如何解决实际工程问题的著作。西安电子科技大学的 Ansoft HFSS 培训中心拥有多年的培训经验和工程经验,此次和 Ansoft 公司合作推出本书,力求为从事射频微波工程设计和研究的科技工作者提供有效的工程仿真分析方法。

本书由 5 章组成,主要分为两大部分。

第一部分包括第 1 章~第 4 章。第 1 章主要介绍微波射频理论的基础知识:首先讲述了电磁场基本原理以及微波工程中的网络分析方法,继而将微波工程问题分为外场问题和内场问题加以阐述,最后介绍了电磁兼容问题以及微波工程领域中的热点与前沿技术。第 2 章介绍微波工程中常用的数值算法,重点阐述了有限元方法的基本原理。第 3 章对 Ansoft HFSS 软件的界面及使用方法作了简单介绍,并给出了在该软件中建立分析的一般过程。第 4 章详细介绍了 Ansoft HFSS 软件的计算原理及技术细则。

第二部分包括第 5 章。该章通过大量的工程实例详细指导读者如何利用该软件来分析微波工程问题。工程实例按照微波工程中的不同领域进行了分类,主要包括微波无源器件、微波天线设计、信号完整性设计、电磁兼容问题研究四个方面的内容。

我们著述本书的立足点是:使读者能够对微波射频和电磁场有限元方法的基本理论有所了解,在此基础上能够以 Ansoft HFSS 为工具,很好地解决微波工程设计中的实际问题。为此,本书力求突出以下特点:

(1) 体系完整。本书以理论联系实际为主线,内容涉及从微波工程基本理论到有限元方法基本理论,再到实际的工程实例,以使读者对微波工程与射频技术有一个全面的了解。

(2) 理论阐述深入浅出。Ansoft HFSS 内部的核心算法非常复杂,读者难以完全掌握,但是了解该算法的基本原理有助于更好地使用软件。本书在介绍有限元算法时,在给出详细的数学论述的同时,通过大量简单实例使得读者能够清楚地了解有限元方法的基本工程。

(3) 可读性强。我们著作本书的指导思想是：既保证全书的高质量和高水平，又力求把可读性放在第一位。在介绍工程实例时通过图文并茂的方式，有效指导读者循序渐进地进行仿真设计。

(4) 应用背景强。本书中包含了大量的工程实例，这些工程实例不仅能够指导读者熟练掌握 Ansoft HFSS 的使用方法，而且能够让读者在解决实际工程问题时有所借鉴。

特别感谢西安电子科技大学的吴建汪硕士、苏涛博士、蒋小勇硕士、周琦硕士、李斌博士、倪大宁硕士、朱永忠博士，感谢他们多年来为培训工作所做的贡献。

感谢出版社的老师为本书的出版所做的辛勤劳动。

我们编写本书的愿望是为广大读者奉献一部具有一定可读性、学术性和实用性的著作。但是，由于微波与射频技术发展极其迅速，因而本书在内容的选取和组织、问题的分析和论述等方面可能存在诸多不足，诚恳欢迎广大读者批评指正。

编者

2007年3月

## 欢迎选购西安电子科技大学出版社教材类图书

~~~~~ <b>国家级、部级重点教材</b> ~~~~~		网络信息安全	11.00
计算机系统结构(第四版)(统编)	25.00	网站建设与维护(崔良海)	18.00
离散数学(第三版)(统编)(乔维声)	16.00	网站建设与维护(廖常武)	19.00
雷达对抗原理(统编)	15.00	Internet技术及其应用教程	15.00
雷达原理(第三版)	23.00	Windows网络程序设计	26.00
通信网的安全——理论与技术	42.00	嵌入式系统原理与开发	21.00
模拟电子线路基础(傅丰林)	16.00	通信网理论与技术	25.00
移动通信(第三版)(统编)(郭梯云)	26.00	计算机图形图像与网页制作(高职)	19.00
智能控制理论和方法	18.00	互联网实用技术与网页制作(高职)	14.00
~~~ <b>全国信息技术水平考试指定教材</b> ~~~		局域网组建、管理与维护(高职)	20.00
计算机网络信息安全理论与实践教程	32.00	综合布线技术(高职)	18.00
网页设计与网站开发基础教程	54.00	计算机网络技术导论	16.00
中小学校园网络管理基础教程	19.00	计算机网络(第二版)(袁家政)	26.00
中小学校园网络管理实验教程	25.00	计算机网络技术(刘敏涵)	20.00
~~~~~ <b>计算机提高普及类</b> ~~~~~		计算机网络(第二版)(蔡皖东)	18.00
计算机应用基础(第三版)(丁爱萍)	19.00	计算机网络(第二版)(雷振甲)	21.00
计算机组装与维护(高职)(杜飞明)	22.00	计算机网络工程	20.00
计算机组装与维护实用教程(第二版)(高职)	29.00	计算机网络实验教程	14.00
计算机应用基础(Windows 2000		计算机组网实验教程	23.00
&Office 2002)(教育部高职)	23.00	计算机网络学习辅导及习题详解	23.00
《计算机应用基础》实践技能训练		网络工程设计与实践	29.00
与案例分析(教育部高职)	11.00	网络应用程序设计	21.00
计算机综合能力实训教程(高职)	10.00	现代网络技术	24.00
办公自动化技术及应用教程	22.00	网络计算	19.00
办公自动化设备的使用和维护		~~~~~ <b>计算机技术类</b> ~~~~~	
(第二版)(高职)	18.00	计算机系统结构(陈智勇)	22.00
网络办公自动化技术及应用(高职)	21.00	计算机系统设计——概念与技术(洪龙)	18.00
~~~~~ <b>计算机网络类</b> ~~~~~		计算机组成原理	
Internet基础与使用(第二版)(高职)	13.00	与系统结构实验教程(杨小龙)	12.00
计算机网络安全(高职)	15.00	计算机系统安全	22.00
计算机网络管理	20.00	实用计算机类毕业设计指导	18.00
网络安全技术(高职)	17.00	计算机原理课程设计	10.00
网络安全与保密	24.00	电子政务理论与实务	20.00
网络信息安全技术	17.00	电子商务概论(李晓燕)	17.00
		电子商务概论(宋沛军)	20.00

数据融合理论与应用(第二版)	20.00	机械加工技术(高职)(魏康民)	24.00
自动控制原理(赵四化)	16.00	计算机辅助机械设计(秦汝明)	19.00
自动控制原理(薛安克)	19.00	数控机床原理与编程(高职)(陈富安)	20.00
《自动控制原理》学习指导与题解(方斌)	22.00	数控加工与编程(高职)	19.00
自动控制原理及其应用(高职)	15.00	数控加工工艺(高职)(赵长旭)	22.00
智能化仪器原理及应用(曹建平)	16.00	数控编程与操作(高职)(秦启书)	16.00
楼宇自动化(高职)	14.00	数控技术及应用(高职)(马一民)	17.00
电梯原理及逻辑排故(高职)	22.00	数控机床故障分析与维修(高职)(潘海丽)	19.00
~~~~~家用电器与机电类~~~~~		数控机床电气控制(高职)(姚勇刚)	21.00
电视原理与系统(赵坚勇)	16.00	机电一体化技术(高职)	17.00
电视原理与电视机检修(高职)	16.00	机床电器 PLC(高职)(李伟)	14.00
数字电视技术	20.00	机床电气与 PLC(高职)	16.00
电器原理与技术(裴昌幸)	24.00	电机及拖动基础(高职)(孟宪芳)	17.00
调音技术(高职)	16.00	电机拖动与控制(高职)(刘保录)	25.00
音响技术	13.00	电机与电气控制(高职)(冉文)	23.00
现代音响与调音技术	19.00	电切削加工技术(高职)(詹华西)	13.00
电气控制与 PLC 原理及应用(常文平)	17.00	金属切削与机床(高职)(聂建武)	22.00
工程力学(皮智谋)(高职)	12.00	模具制造技术(高职)(刘航)	22.00
工程力学(史艺农)(高职)	23.00	液压与气动技术(朱梅)	19.00
工程材料与热加工技术(高职)(程晓宇)	20.00	特种加工技术(周旭光)	10.00
机械工程基础(李茹)(高职)	26.00	汽车电工电子技术(高职)(袁建华)	20.00
机械设计基础(赵冬梅)(高职)	21.00	工业机器人技术(高职)(郭洪红)	16.00
机械设计基础(张京辉)(高职)	24.00	互换性与技术测量(高职)(杨好学)	16.00
机械设计基础(郭红星)(高职)	20.00	车工基本技能训练(高职)(武建荣)	6.00
机械基础(周家泽)	17.00	钳工基本技能训练(高职)(彭彦)	5.00
机械 CAD/CAM 技术(方新)	20.00	焊接基本技能训练(高职)(王红英)	6.00
机械制图(刘家平)(高职)	32.00	建筑管道工基本技能训练(高职)(陈斐明)	8.00
机械制造工艺装备(高职)(吴秀佳)	19.00	铣工基本技能训练(高职)(韩振武)	4.00
机械制造技术(高职)(邵堃)	24.00	高等教育管理导论(研究生)	36.00

欢迎来函索取本社最新书目和教材介绍, 欢迎投稿!

从邮局或银行汇款邮购者, 汇款单上务必写清收书人姓名、地址、邮编、电话。款到后我社将挂号发书, 加收5元包装邮费(一次购书30元以上者可免收邮费)。

通信地址: 西安市太白南路2号 西安电子科技大学出版社发行部 邮编: 710071

电话: (029) 88201467 传真: (029) 88213675

主页: <http://www.xduph.com> E-mail: [xdupfb@pub.xaonline.com](mailto:xdupfb@pub.xaonline.com)



# 目 录

<b>第 1 章 微波理论和工程的基础知识</b> .....	1
1.1 电磁场的基本理论 .....	1
1.1.1 麦克斯韦方程组 .....	1
1.1.2 时谐场的麦克斯韦方程组 .....	2
1.1.3 波动方程及其边界条件 .....	2
1.2 微波工程中的网络方法 .....	3
1.2.1 微波传输线理论 .....	3
1.2.2 微波网络及其 S 参数 .....	5
1.3 微波工程中的外场问题 .....	6
1.3.1 电磁波的传播 .....	6
1.3.2 天线的分析和设计 .....	8
1.3.3 电磁散射 .....	10
1.4 微波工程中的内场问题 .....	10
1.4.1 导波结构 .....	10
1.4.2 微波谐振器 .....	14
1.4.3 微波无源元件 .....	17
1.5 微波系统的电磁兼容问题 .....	21
1.6 微波工程领域的前沿和热点 .....	22
<b>第 2 章 微波工程问题的有限元数值计算方法</b> .....	23
2.1 微波工程问题的分析方法 .....	23
2.2 微波工程问题的数值分析方法 .....	24
2.2.1 加权残数法的概念 .....	24
2.2.2 基于加权残数法的矩量法和有限元方法简介 .....	25
2.2.3 差分法原理 .....	26
2.2.4 基于差分法的时域有限差分法 .....	27
2.3 有限元方法的基本原理 .....	27
2.3.1 有限元方法的原理 .....	28
2.3.2 三维时谐场有限元问题 .....	31
2.3.3 有限元方程组的求解 .....	35
2.4 电磁内问题和外问题的不同处理 .....	37
<b>第 3 章 Ansoft HFSS 使用介绍</b> .....	38
3.1 工作环境介绍 .....	38
3.1.1 菜单栏 .....	38
3.1.2 工具栏 .....	47

3.1.3	状态栏 .....	47
3.1.4	工程管理窗口 .....	47
3.1.5	特性窗口 .....	47
3.1.6	进度窗口 .....	47
3.1.7	信息管理窗口 .....	47
3.1.8	3D 模型窗口 .....	48
3.2	建立 HFSS 工程的一般过程 .....	48
<b>第 4 章</b>	<b>Ansoft HFSS 软件的计算原理 .....</b>	<b>51</b>
4.1	剖分网格的生成 .....	51
4.1.1	手动设置网格 .....	52
4.1.2	表面近似设置 .....	53
4.1.3	引线的剖分处理 .....	54
4.2	HFSS 的基本求解过程 .....	55
4.2.1	输入输出端口的处理 .....	55
4.2.2	自适应分析过程 .....	57
4.2.3	单个频率的解和扫频解 .....	59
4.2.4	HFSS 中求解方法的类型 .....	60
4.2.5	电磁场矢量的求解 .....	61
4.3	HFSS 中 S 参数的定义和求解 .....	62
4.3.1	归一化 S 参数 .....	62
4.3.2	特性阻抗的计算 .....	63
4.3.3	阻抗乘法器的使用 .....	64
4.3.4	S 矩阵的计算 .....	64
4.3.5	Z 矩阵的计算 .....	65
4.3.6	Y 矩阵的计算 .....	65
4.4	端口传输线参数的计算 .....	65
4.4.1	复传播常数的计算 .....	65
4.4.2	等效波长的计算 .....	65
4.4.3	相对介电常数的计算 .....	66
4.4.4	S 矩阵的延伸 .....	66
4.5	HFSS 中辐射问题的求解 .....	66
4.5.1	HFSS 中辐射问题的计算方法 .....	66
4.5.2	球坐标系下辐射计算的处理 .....	67
4.5.3	天线阵列的计算方法 .....	69
4.5.4	天线参数的计算 .....	72
4.6	HFSS 中的边界条件 .....	76
4.6.1	理想导体边界 .....	76
4.6.2	阻抗边界 .....	76
4.6.3	辐射边界 .....	77
4.6.4	理想匹配层 .....	77
4.6.5	有限导体边界 .....	79
4.6.6	对称边界 .....	79



4.6.7	主从边界 .....	80
4.6.8	集总 RLC 边界 .....	81
4.6.9	分层阻抗边界 .....	82
4.6.10	无限大地平面 .....	82
4.6.11	频率相关的边界和激励 .....	83
4.6.12	HFSS 中的默认边界分配 .....	83
4.7	HFSS 中的激励设置 .....	83
4.7.1	波端口激励 .....	84
4.7.2	集总端口激励 .....	84
4.7.3	差分对激励 .....	85
4.7.4	磁偏置源激励 .....	87
4.7.5	照射波激励 .....	88
4.8	HFSS 中的材料设置 .....	88
4.8.1	相对磁导率 .....	88
4.8.2	相对介电常数 .....	88
4.8.3	电导率 .....	89
4.8.4	介质损耗角正切 .....	89
4.8.5	磁损耗角正切 .....	89
4.8.6	各向异性材料 .....	89
4.9	HFSS 提供的优化计算功能 .....	92
4.9.1	优化方法的选择 .....	93
4.9.2	优化变量和设计空间 .....	93
4.9.3	目标函数 .....	93
4.9.4	线性约束 .....	94
4.9.5	目标权值 .....	94
4.9.6	优化计算中的步长 .....	94
4.9.7	敏感性分析 .....	95
4.9.8	调谐分析 .....	95
<b>第 5 章</b>	<b>工程实例 .....</b>	<b>96</b>
5.1	微波无源元件 .....	96
5.1.1	滤波器的基本响应 .....	96
5.1.2	交叉耦合滤波器设计 .....	100
5.1.3	源-负载耦合的交叉耦合滤波器的设计 .....	110
5.1.4	其他微波无源元件 .....	121
5.2	微波天线设计 .....	133
5.2.1	对称振子 .....	133
5.2.2	双模圆锥喇叭 .....	143
5.2.3	微带天线 .....	151
5.2.4	波导缝隙阵 .....	161
5.3	信号完整性设计 .....	172
5.3.1	低压差分信号对 .....	173
5.3.2	非理想平板 .....	192

5.4 电磁兼容问题研究 .....	215
5.4.1 问题简介 .....	215
5.4.2 工程实例 .....	218
5.4.3 通信系统耦合度定义及其微波网络模型 .....	227
<b>参考文献</b> .....	<b>230</b>

# 第 1 章 微波理论和工程的基础知识

传统上,微波或射频指的是 300 MHz~3000 GHz 频率范围内的电磁波。事实上,目前射频工程师的研究对象已从数百赫兹一直延伸到光学波段,其应用领域有雷达、通信、射电天文、生物电磁学、电磁能应用及环保科学。无论在哪个应用领域,射频工程师需要解决的核心工程问题都是一定边界条件和激励条件下麦克斯韦(Maxwell)方程组的求解问题。因此,在本章中我们简要给出射频工程涉及到的基本电磁场知识。

## 1.1 电磁场的基本理论

### 1.1.1 麦克斯韦方程组

电磁波的运动规律遵从 19 世纪给出的麦克斯韦方程组,是英国科学家麦克斯韦对法拉第(Faraday)等前人的实验成果的总结和发展。麦克斯韦方程组是描述宏观电磁场规律的基本方程。微分形式的麦克斯韦方程组在空间中的任何一点都成立,它由以下四个方程组成:

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) \quad (1-1-1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \quad (1-1-2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \rho(\mathbf{r}, t) \quad (1-1-3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (1-1-4)$$

其中,  $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{J}$  和  $\rho$  都是位置( $\mathbf{r}$ )与时间( $t$ )的实变函数,其相应的名称和单位如下:

$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ ——电场强度(V/m);

$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ ——磁通量密度(Wb/m<sup>2</sup>);

$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ ——磁场密度(A/m);

$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ ——电位移(C/m<sup>2</sup>);

$\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$ ——电流密度(A/m<sup>2</sup>);

$\rho(\mathbf{r}, t)$ ——电荷密度(C/m<sup>3</sup>)。

并且,由上面的麦克斯韦方程组可以导出电流密度  $\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$  和电荷密度  $\rho(\mathbf{r}, t)$  满足的连续性定理:

$$\nabla \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \rho(\mathbf{r}, t) \quad (1-1-5)$$

麦克斯韦方程组的前两个方程是旋度方程,分别称为法拉第定律和麦克斯韦-安培环路定律;后两个方程是散度方程,分别称为高斯定律和磁场高斯定律。

因为电磁场存在于媒质中,所以  $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{D}$  和  $\mathbf{J}$  满足媒质的宏观本构关系:

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E} \quad (1-1-6)$$

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{H} \quad (1-1-7)$$

$$\mathbf{J} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{E} \quad (1-1-8)$$

式中, 本构参数  $\boldsymbol{\varepsilon}$ 、 $\boldsymbol{\mu}$  和  $\boldsymbol{\sigma}$  分别表示媒质的介电常数(F/m)、磁导率(H/m)和电导率(S/m)。对于自由空间等各向同性简单媒质, 这些本构参数退化为标量。在自由空间中,  $\varepsilon = \varepsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12}$  (F/m),  $\mu = \mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7}$  (H/m); 而在一般各向同性媒质中,  $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ ,  $\mu = \mu_r \mu_0$ , 其中  $\varepsilon_r$  称为相对介电常数,  $\mu_r$  称为相对磁导率。特别地, 对于非均匀媒质, 本构参数是位置的函数。

### 1.1.2 时谐场的麦克斯韦方程组

若电磁场的时间变化函数是简谐的, 则利用复数量可以使数学分析简化。一个复数量  $U$  和一个瞬时量  $u$  可以通过以下关系式相联系:

$$u = \sqrt{2} \operatorname{Re}(Ue^{j\omega t}) \quad (1-1-9)$$

因此, 我们可以采用这种关系, 给出(1-1-1)式~(1-1-4)式的时谐场表达式(因为在后文中我们一般只研究时谐情况, 为了简便, 这里电场强度、磁场强度等记号仍采取和前文瞬时值相同的形式):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} \quad (1-1-10)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J} \quad (1-1-11)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1-1-12)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1-1-13)$$

**【注意】** 这里的复数量是前文瞬时值的有效值, 它们不再是时间的函数, 但仍然是位置的函数。这种选择的理由是: ① 在实际工程中, 这些物理量通常是用有效值来标明或测量的; ② 复数功率和能量的方程能同它们的瞬时值对应式保持同样的比例因子。

### 1.1.3 波动方程及其边界条件

注意到, 在(1-1-10)式~(1-1-13)式描述的麦克斯韦方程组中只有前三个方程式是独立的, 第四式可以由前三个方程推出。在(1-1-10)式和(1-1-11)式这两个方程中, 每个方程中同时包含电场强度和磁场强度, 因而无法独立求解。

结合(1-1-6)式~(1-1-8)式给出的本构关系, 联立(1-1-10)式和(1-1-11)式并从中消去电场强度  $\mathbf{E}$  和磁场强度  $\mathbf{H}$ , 可以得到只含一个未知量的二阶微分方程:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\boldsymbol{\mu}} \nabla \times \mathbf{E} \right) - \omega^2 \boldsymbol{\varepsilon}_c \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{J}_i \quad (1-1-14)$$

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\boldsymbol{\varepsilon}_c} \nabla \times \mathbf{H} \right) - \omega^2 \boldsymbol{\mu} \mathbf{H} = \nabla \times \left( \frac{1}{\boldsymbol{\varepsilon}_c} \mathbf{J}_i \right) \quad (1-1-15)$$

式中,  $\mathbf{J}_i$  是外加电流或源电流,  $\boldsymbol{\varepsilon}_c = \boldsymbol{\varepsilon} - j\boldsymbol{\sigma}/\omega$  是感应电流  $\boldsymbol{\sigma}\mathbf{E}$  和位移电流  $j\omega\mathbf{D}$  的综合贡献, 这里  $\boldsymbol{\sigma}$  表示媒质的电导率。

以上方程称为矢量波动方程, 也称为矢量 Helmholtz 方程。

**【注意】** ① 在外加激励不为零时, 即(1-1-14)式和(1-1-15)式的右端不为 0 时, 称为非齐次矢量波动方程, 也称为确定性问题。

② 在外加激励为零时,即(1-1-14)式和(1-1-15)式的右端为0时,称为齐次矢量波动方程,也称为本征值问题。

③ 在电磁工程中为了分析方便,通常假设电磁场问题不随三维空间中的某一维变化(例如  $xyz$  直角坐标系中的  $z$  方向),则(1-1-14)式和(1-1-15)式中变量的  $z$  分量一般满足标量波动方程。这一方程也常见于文献的描述中,但是本书介绍的 Ansoft HFSS 软件是基于矢量波动方程的,故对于其特殊情况——标量波动方程不再详细介绍。

完整的电磁工程问题的描述是包含以上矢量波动方程和具体工程对象的边界、激励条件的边值问题模型,即矢量波动方程在不同区域、边界和激励条件下的解是不同的。

一个工作在边界  $\Gamma$  包围的区域  $\Omega$  内的实际工程问题中的边界条件可以归纳为三类:

(1) 第一类边界条件,也称为狄利克莱(Dirichlet)边界条件。这种边界条件直接给出变量在边界上的值:

$$U|_{\Gamma_1} = U_1 \quad (1-1-16)$$

式中,  $\Gamma_1$  为第一类边界,  $U_1$  为已知函数,可以为常数或0。

(2) 第二类边界条件,也称为诺依曼(Neumann)边界条件。这种边界条件可以表示为

$$\frac{\partial U}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = U_2 \quad (1-1-17)$$

式中,  $\Gamma_2$  为第二类边界,  $U_2$  为已知函数,可以为常数或0。

(3) 第三类边界条件,也称为混合边界条件,是第一类和第二类边界条件的组合。

## 1.2 微波工程中的网络方法

### 1.2.1 微波传输线理论

微波传输线可以传输微波信号,其具体结构在后文介绍。与低频传输线不同,微波传输线具有分布参数效应,如图1-2-1所示。

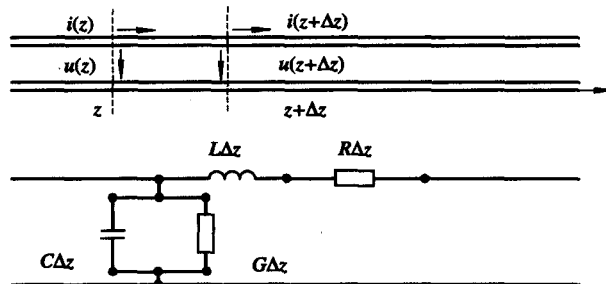


图1-2-1 微波传输线的分布参数效应

微波在微波传输线上的传输具有波动性,这种波动性由传输线方程组(也称为电报方程组)描述:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial z} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial z} = Gu + C \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (1-2-1)$$

一般情况下，经常将传输线简化为对应  $R=G=0$  情况的无耗传输线。其通解一般可以写为：

$$u(z) = u^+ e^{-j\beta z} + u^- e^{j\beta z} \quad (1-2-2)$$

$$i(z) = \frac{1}{Z_0} (u^+ e^{-j\beta z} - u^- e^{j\beta z}) \quad (1-2-3)$$

式中， $\beta$  为波在传输线上的传播常数； $Z_0$  为传输线的特性阻抗，可以理解为正向波电压与正向波电流的比值，其大小与传输线的横截面特性相关。

**【注意】** 从(1-2-2)式和(1-2-3)式可以看到，微波传输线上可以存在两种相反方向传输的波。相反方向传输的波是由于反射引起的，可以用反射系数  $\Gamma$  来度量反射，定义为反向波电压比正向波电压。

以上通解可以在传输线具体的端接负载 ( $Z_L = R_L + jX_L$ ) 和激励情况下求得各种特解，对应于传输线的不同工作状态：

(1) 当传输线终端接的负载值与特性阻抗相等时，称为匹配负载，此时传输线上波没有反射，称为行波状态。

(2) 当传输线终端接短路负载、开路负载或纯电抗时，传输线上波为全反射，称为驻波状态。

(3) 当传输线终端接其它一般负载时，传输线上波存在反射，称为行驻波状态，如图 1-2-2 所示。

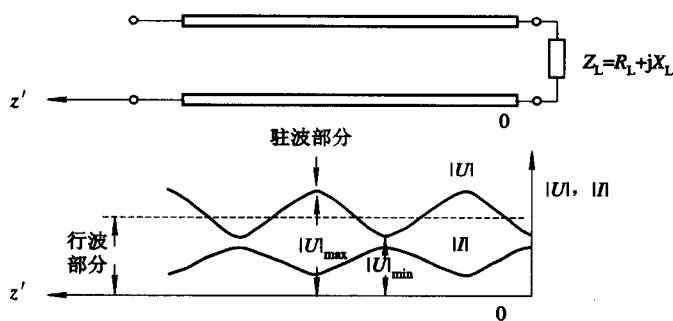


图 1-2-2 传输线的行驻波工作状态

除了反射系数  $\Gamma$  这个重要的参数外，驻波比  $\rho$  (通常也用 VSWR 标记) 和输入阻抗  $Z$  也是常用的基本参数。

**驻波比  $\rho$ ：** 传输线上电压模值的最大值和最小值之比，如图 1-2-2 所示。显然，驻波比  $\rho$  的取值为  $[1, \infty)$ ，在行波状态下为 1，在驻波状态下为  $\infty$ 。

**输入阻抗  $Z$ ：** 传输线上某一点处电压和电流的比值。

常用的无耗传输线的这三个工作参数间的关系如表 1-2-1 所示。

表 1-2-1 工作参数间的关系

	反射系数 $\Gamma(z)$	阻抗 $Z(z)$	VSWR( $\rho$ )
$\Gamma(z)$	$\Gamma(z) = \frac{u^-(z)}{u^+(z)} = \Gamma_L e^{-j2\beta z}$	$\Gamma(z) = \frac{Z(z) - Z_0}{Z(z) + Z_0}$	$ \Gamma(z)  = \frac{\rho - 1}{\rho + 1}$
$Z(z)$	$Z(z) = Z_0 \frac{1 + \Gamma(z)}{1 - \Gamma(z)}$	$Z(z) = \frac{U(z)}{I(z)} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan\theta}{Z_0 + jZ_L \tan\theta}$	$Z(z) = \frac{1 + j\rho \tan\beta(z + \Delta z)}{\rho + j \tan\beta(z + \Delta z)}$
$\rho$	$\rho = \frac{1 +  \Gamma(z) }{1 -  \Gamma(z) }$	$\rho = \frac{\sqrt{(R_L + Z_0)^2 + x_L^2} + \sqrt{(R_L - Z_0)^2 + x_L^2}}{\sqrt{(R_L + Z_0)^2 + x_L^2} - \sqrt{(R_L - Z_0)^2 + x_L^2}}$	$\rho = \frac{ U(z) _{\max}}{ U(z) _{\min}}$

从表 1-2-1 中可以看出：

- (1) 三个工作参数的值之间是相互联系的。
- (2) 无耗传输线上任一点处的反射系数的模值为常数，等于负载  $Z_L$  处的反射系数  $\Gamma_L$  (尽管线上距离负载电长度  $\theta = \beta z$  处的输入阻抗是变化的)。
- (3) 表中出现的  $\Delta z$  是等效长度，与负载的相位有关，这里只是为了内容的完整性而列举，不再详细介绍。

### 1.2.2 微波网络及其 S 参数

微波工程问题可以采用网络方法进行研究。微波工程问题可以等效为具有某种网络特性的“黑匣子”，因此，网络方法更多关心的是微波问题呈现的外部特性。电磁场论和网络方法代表着不同的两个方面：场是网络的内部原因，而网络则是场的外部表现。

网络方法在微波工程中占有重要地位，工程师们关心的微波问题的特性往往采用网络参数来描述，微波测量和计算最终给出的也常常是微波问题的网络参数。

一个  $N$  端口微波网络常用 S 参数来进行描述，如图 1-2-3 所示。图中，第  $i$  个端口的归一化电压入射波为  $a_i$ ，归一化电压反射波为  $b_i$ 。入射波  $a$  和反射波  $b$  的大小由端口所接传输线上的波来定义：

$$a = \frac{u^+ e^{-j\beta z}}{Z_0} = \frac{1}{2} \left( \frac{u}{\sqrt{Z_0}} + i \sqrt{Z_0} \right) \quad (1-2-4)$$

$$b = \frac{u^- e^{j\beta z}}{Z_0} = \frac{1}{2} \left( \frac{u}{\sqrt{Z_0}} - i \sqrt{Z_0} \right) \quad (1-2-5)$$

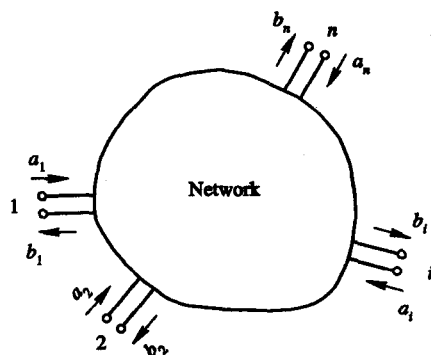


图 1-2-3 微波网络的 S 参数

其中,  $u$  和  $i$  分别为端口处的归一化电压和归一化电流。因此,  $N$  端口微波网络的  $S$  参数可以写为  $N$  个端口间反射波  $b$  和入射波  $a$  之间的线性关系:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (1-2-6)$$

**【注意】** ① 如果微波网络中只有各向同性的互易媒质, 则各个端口间的场量是可逆的, 这种网络称为互易网络。反之, 如果微波网络中填充了铁氧体或等离子体等非互易媒质, 则这种网络称为非互易网络。网络互易时, 有  $S_{ij} = S_{ji}$ 。

② 如果微波网络是空间对称的(包括几何对称和媒质对称), 则称为对称网络; 反之, 称为非对称网络。网络对称时, 有  $S_{ii} = S_{jj}$ 。

③ 如果从网络的各个端口进入的功率之和等于网络各个端口输出的功率之和, 则这种网络称为无耗网络。无耗网络的  $S$  参数满足么正性, 即  $I - S^+ S = 0$ 。

④ 每个  $S$  参数都对应明确的物理意义。以双口网络为例,  $S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}$ , 即二端口端接匹配负载时一端口的反射系数。

### 1.3 微波工程中的外场问题

微波工程中的外场问题包括电磁波的辐射问题(即微波天线的分析和设计)、电磁波的空间传播特性、电磁波与目标的相互作用(即电磁散射问题)。

#### 1.3.1 电磁波的传播

电磁波以波动的形式存在于空间中, 微波能量在媒质中依靠这种波动在空间中进行传播, 并发生各种各样的传播现象。下面介绍电磁波传播的基本概念。

**平面波近似:** 所激发的电磁波在距离波源很远的小范围内观察, 都可以近似为均匀平面波。均匀平面波是在均匀的简单媒质中电磁波传播的最简单形式。均匀平面波的电磁场量在垂直于传播方向的横截面上是均匀的和同相的, 即垂直于传播方向的平面既是等相位面, 又是等振幅面, 称为波阵面。

例如, 一个沿  $z$  方向传播的均匀平面波的  $x$  方向的电场分量可以写为

$$E_x = E_0 e^{-jkt} \quad (1-3-1)$$

式中,  $E_0$  为常数;  $k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$  为传播常数, 在自由空间中,  $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ 。

**有耗媒质中的传播:** 当媒质有极化损耗时, 介电常数为复数, 即

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1-3-2)$$

则传播常数为

$$k = \omega\sqrt{\mu(\epsilon' - j\epsilon'')} \quad (1-3-3)$$

当媒质有导电性时, 设电导率为  $\sigma$ , 则传播常数为

$$k = \omega\sqrt{\mu\left(\epsilon - j\frac{\sigma}{\omega}\right)} \quad (1-3-4)$$



可以看到,在有损耗的媒质中,电磁波的传播常数为复数,即在传播中存在衰减。

特别地,对于 $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \gg 1$ 的良好导体情况,电磁波的透入深度或趋肤深度定义为:场的振幅

衰减为初始值的 $\frac{1}{e}$ ( $\approx 0.369$ )所行进的距离,记为 $\delta \approx \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$ 。

**极化:**波的极化通常是指电场矢量 $E$ 的尖端在空间随时间变化的方向。如果矢量的尖端在一条直线上运动,那么这种电场极化方式称之为线极化波。

如果矢量的尖端的运动轨迹是一个圆或椭圆,则称为圆极化波或椭圆极化波。特别地,如果用右手的拇指指向波传播的方向,其他四指所指的方向正好与电场矢量运动的方向相同,则称为右旋极化波。反之,如果可以用左手表示,则称为左旋极化波。

图 1-3-1 所示为电磁波的线极化和椭圆极化。

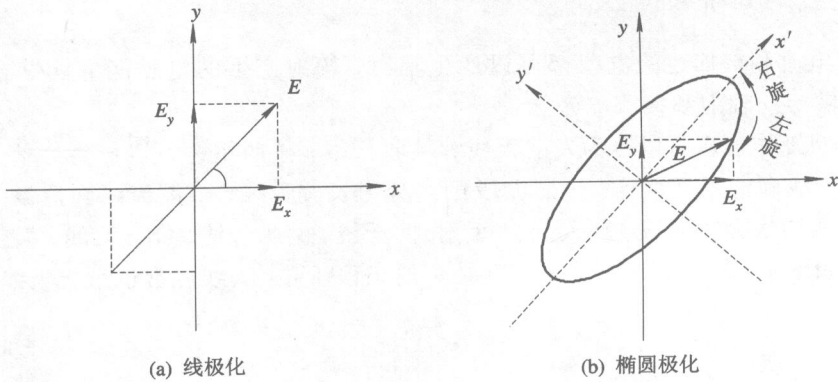


图 1-3-1 电磁波的线极化和椭圆极化

**坡印廷(Poynting)矢量:**时谐场的平均坡印廷矢量定义为

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \quad \text{W/m}^2 \quad (1-3-5)$$

它也称为功率流密度,其方向垂直于电场强度 $E$ 和磁场强度 $H$ 构成的平面(如图 1-3-2 所示)。

**边界条件:**对于区域 1 和区域 2 之间的一个静止的边界,如令面法向单位矢量 $n$ 由区域 2 指向区域 1,则有如下边界条件:

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = \mathbf{0} \quad (1-3-6)$$

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = \mathbf{J}_s \quad (1-3-7)$$

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) = 0 \quad (1-3-8)$$

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) = \rho_s \quad (1-3-9)$$

式中,下标 1 和 2 分别表示区域 1 和 2 中的场量; $\mathbf{J}_s$  为边界上的面电流密度; $\rho_s$  为边界上的面电荷密度。

特别地,如果某一个区域是电导率 $\sigma = \infty$ 的理想导体,则在理想导体内部没有场,场只存在于一种媒质中,则边界条件为:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (1-3-10)$$

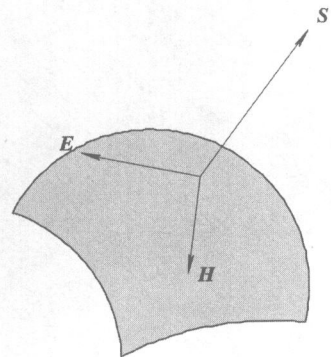


图 1-3-2 坡印廷矢量示意图