

# HFSS

## 原理与工程应用

谢拥军 刘莹 编著  
李磊 丁海强 雷振亚



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# HFSS 原理与工程应用

谢拥军 刘莹 编著  
李磊 丁海强 雷振亚

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书内容包括 Ansoft HFSS 软件的微波工程基础和计算方法原理、使用技巧和工程应用指南。本书内容由 5 章组成。第 1 章介绍了微波技术的基本理论和基础知识;第 2 章讲述了电磁场有限元方法的基本原理;第 3 章对软件的界面、使用方法作了简单介绍;第 4 章详细给出了 Ansoft HFSS 的计算原理与使用技巧;第 5 章通过大量的工程实例使读者能够熟练掌握 Ansoft HFSS 软件,对于实际工程问题给出正确的仿真解决方案。

本书体系完整、可读性强且工程应用特色鲜明,可作为高等院校、科研院所、公司等从事射频微波技术的工程人员的工程手册,也可作为高校相关专业的研究生和本科生的科研教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

HFSS 原理与工程应用/谢拥军等编著. —北京:科学出版社,2009  
ISBN 978-7-03-024741-4

I. H… II. 谢… III. 电磁场-有限元分析-应用软件, Ansoft HFSS  
IV. 0441.4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 094513 号

---

责任编辑:匡 敏 潘斯斯 潘继敏 / 责任校对:钟 洋  
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009 年 9 月第一次印刷 印张:26 1/4

印数:1—3 500 字数:594 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

微波技术广泛应用在网络设备与宽带部件、雷达、通信、电子对抗、集成电路、印刷电路板设计、医疗电子系统、电磁兼容、微波能应用、微波环境遥感系统等领域。微波工程的分析和设计工作具有很大的难度,传统的解析分析方法只能适用于少数简单问题,对于电磁系统高度复杂的当代微波工程问题,往往采用近似分析和实验验证,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。

20世纪60年代出现了微波分析的数值方法,在此基础上,第一个微波技术的电子设计自动化(EDA)软件——美国Ansoft公司的HFSS(High Frequency Structure Simulator)软件在80年代诞生。现在,微波EDA软件已经成为微波工程师进行天线、微波电路、电磁兼容等设计的最基本、最有力的工具。

HFSS是基于电磁场有限元方法(FEM)分析微波工程问题的三维电磁仿真软件。HFSS以其无与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,成为微波设计的首选工具和行业标准,已经被广泛应用于航空、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各种微波结构。此次,西安电子科技大学和美国Ansys公司中国子公司(原美国Ansoft(中国)公司)合作推出本书,为从事微波技术的工程人员介绍该软件的基础知识、使用技巧和工程应用方法。

本书内容由5章组成。第1章简要介绍了微波工程设计中涉及的专业基础知识。第2章介绍了数值方法的原理,着重于有限元方法原理。前两章内容是正确使用HFSS软件的基础知识。第3章对于HFSS软件的界面及使用方法作了简介。第4章中包含了HFSS软件的使用技巧和深层的应用原理,既能起到初学者入门指南的作用,也可满足部分高水平用户的需求。第5章给出了HFSS软件在微波技术9个重要领域应用的20余个工程实例,所有工程实例均包括从设计背景、设计原理到仿真实现的完整流程,突出了HFSS软件面向工程的各种解决方案。

在写作中,考虑到软件功能的不断升级和读者群的多种需求层次,编著者力求建立从基础到应用的完整体系,理论阐述部分深入浅出,仿真流程部分图文并茂,帮助读者获得HFSS软件的基本概念和使用方法。并在此基础上,给出大量的软件使用指南和应用技巧,帮助读者正确、灵活地使用软件。HFSS软件是一个应对日益发展的工程需求而不断发展的软件,与此同时它应用于不同设计问题时也具有其特殊性。但是软件最大的实用性在于其协同多种Ansoft的其他EDA软件所提供的设计“平台”的概念,关于这一点,编著者希望通过第5章的大量工程实例来帮助读者建立这一设计理念和设计方法。这些工程实例中,也包含了多年来本书编著者使用HFSS软件解决工程问题的心得体会。

特别感谢西安电子科技大学的李晓峰、王瑞、徐挺威、田超、吴召海、莫远楠、许昭、史

少洪、杨晓东等为本书付出的辛勤劳动。

感谢美国 Ansys 公司中国子公司首席代表邱春雷先生及其技术支持团队对于本书的大力支持。

由于微波与射频技术发展极其迅速,因而在内容的选取、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。

编著者  
2009年6月

# 目 录

## 前言

<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
1.1.4 电磁波的传播 .....	3
1.2 微波工程中的网络方法 .....	5
1.2.1 微波传输线理论 .....	5
1.2.2 微波网络及其 S 参数 .....	7
1.3 微波工程中的内问题 .....	8
1.3.1 导波结构 .....	8
1.3.2 微波谐振器 .....	11
1.3.3 微波无源元件 .....	14
1.3.4 微波内问题的复本征值问题 .....	18
1.4 微波工程中的外问题 .....	18
1.4.1 天线的分析和设计 .....	18
1.4.2 电磁散射 .....	24
1.5 微波系统的电磁兼容问题 .....	24
1.6 微波周期结构的分析方法 .....	25
1.7 微波工程领域的前沿和热点 .....	26
<b>第 2 章 微波工程问题的有限元数值计算方法</b> .....	28
2.1 微波工程问题的分析方法 .....	28
2.2 微波工程问题的数值分析方法 .....	29
2.2.1 加权残数法的概念 .....	29
2.2.2 基于加权残数法的矩量法和有限元方法简介 .....	30
2.2.3 差分法原理 .....	31
2.2.4 基于差分法的时域有限差分法 .....	32
2.3 有限元方法的基本原理 .....	32
2.3.1 有限元方法的原理——从一维的例子来看其建模的过程 .....	33
2.3.2 三维时谐场有限元问题 .....	36
2.3.3 有限元方程组的求解 .....	40
2.3.4 有限元方程组的区域分解算法和条件数预处理技术 .....	43

2.4	电磁内问题和外问题的不同处理	43
<b>第3章</b>	<b>Ansoft HFSS 使用介绍</b>	44
3.1	工作环境介绍	44
3.1.1	菜单栏	44
3.1.2	工具栏	53
3.1.3	状态栏	53
3.1.4	工程管理窗口	54
3.1.5	属性窗口	54
3.1.6	进度窗口	54
3.1.7	信息管理窗口	54
3.1.8	3D 模型窗口	54
3.2	建立 HFSS 工程的一般过程	55
<b>第4章</b>	<b>Ansoft HFSS 软件的计算原理和使用技巧</b>	57
4.1	HFSS 项目求解分类及过程	58
4.1.1	本征值求解和激励求解	58
4.1.2	HFSS 中 S 参数的定义和求解	59
4.2	HFSS 项目的建模	63
4.2.1	HFSS 软件参数化建模的常用技巧	63
4.2.2	HFSS 软件的高级建模方法	79
4.2.3	HFSS 软件中的网格剖分原理	82
4.3	HFSS 项目的激励设置	85
4.3.1	HFSS 软件的波端口	85
4.3.2	HFSS 软件的集总端口	92
4.3.3	HFSS 软件的 Floquet 端口	95
4.3.4	差分对激励	95
4.3.5	磁偏置源激励	97
4.3.6	照射波激励	98
4.4	HFSS 项目的边界条件	99
4.4.1	理想导体边界	99
4.4.2	理想导磁体边界	100
4.4.3	阻抗边界	100
4.4.4	辐射边界	101
4.4.5	理想匹配层	102
4.4.6	有限导体边界	104
4.4.7	对称边界	104
4.4.8	主从边界	106
4.4.9	集总 RLC 边界	107
4.4.10	分层阻抗边界	108

4.4.11	无限大地平面	108
4.4.12	网屏阻抗边界条件	109
4.4.13	频率相关的边界和激励	109
4.4.14	HFSS 中的默认边界分配	110
4.5	HFSS 项目的材料设置	110
4.5.1	相对磁导率	110
4.5.2	相对介电常数	110
4.5.3	电导率	111
4.5.4	介质损耗角正切	111
4.5.5	磁损耗角正切	111
4.5.6	各向异性材料	111
4.6	HFSS 项目的辐射和散射问题设置	115
4.6.1	HFSS 软件中辐射问题的计算方法	115
4.6.2	HFSS 软件中散射问题的计算方法	123
4.7	HFSS 项目的求解设置	124
4.7.1	HFSS 软件的基函数类型	124
4.7.2	矩阵方程求解器	126
4.7.3	自适应迭代求解分析过程	127
4.7.4	单个频率求解和扫频解	129
4.8	HFSS 项目的后处理	130
4.8.1	电磁场矢量的求解	130
4.8.2	场计算器的使用	132
4.8.3	HFSS 软件提供的优化计算功能	147
<b>第 5 章</b>	<b>工程应用实例</b>	<b>155</b>
5.1	微波无源元件	155
5.1.1	微波滤波器	155
5.1.2	微波混合接头	177
5.2	微波天线	190
5.2.1	对称振子	190
5.2.2	双模圆锥喇叭	202
5.2.3	微带贴片天线	210
5.2.4	波导缝隙阵	224
5.2.5	螺旋天线分析	235
5.2.6	共形天线	251
5.3	频率选择表面	268
5.3.1	设计背景	268
5.3.2	设计原理	269
5.3.3	HFSS 软件的仿真实现	271



---

5.3.4	仿真结果的分析 and 讨论 .....	281
5.4	信号完整性分析 .....	282
5.4.1	信号完整性基本参数分析 .....	283
5.4.2	PCB 板信号完整性分析 .....	293
5.4.3	对导出的 HFSS project 进行仿真分析 .....	302
5.5	大功率微波的热分析 .....	305
5.5.1	研究背景 .....	305
5.5.2	铁氧体简介及环形器设计原理 .....	305
5.5.3	仿真设计过程简介 .....	307
5.5.4	HFSS 仿真流程 .....	308
5.5.5	ePhysics™ 介绍 .....	321
5.5.6	使用 ePhysics™ 对环形器进行热及应力分析 .....	324
5.6	电磁兼容分析 .....	347
5.6.1	天线间互耦分析 .....	347
5.6.2	“自顶而下”的电磁兼容设计流程 .....	353
5.7	电磁散射 .....	360
5.8	相控阵天线的单元法分析及 RCS 计算 .....	372
5.9	协同设计方法——LTCC 器件的协同仿真 .....	385
5.9.1	Ansoft Designer/Nexxim 软件简介 .....	385
5.9.2	LTCC 技术简介 .....	387
5.9.3	LTCC 器件协同设计原理 .....	388
5.9.4	基于 HFSS 和 Designer 协同仿真设计 .....	390
参考文献 .....		409

# 第 1 章 微波理论和工程的基础知识

传统上,微波或者射频指的是 300MHz~3000GHz 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,在本章中简要给出射频工程涉及的基本电磁场知识。

## 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:

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

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

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

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

式中,  $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{J}$  和  $\rho$  都是位置 ( $\mathbf{r}$ ) 与时间 ( $t$ ) 的实变函数。 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  为电场强度, V/m;  $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$  为电位移, C/m<sup>2</sup>;  $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$  为磁通量密度, Wb/m<sup>2</sup>;  $\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$  为电流密度, A/m<sup>2</sup>;  $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$  为磁场强度, A/m;  $\rho(\mathbf{r}, t)$  为电荷密度, C/m<sup>3</sup>。

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。

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

$$\mathbf{D} = \bar{\epsilon} \cdot \mathbf{E} \quad (1-1-6)$$

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

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

式中,本构参数  $\bar{\epsilon}$ 、 $\bar{\mu}$  和  $\bar{\sigma}$  分别表示介质的介电常量(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介质,这些本构参数退化为标量,在自由空间中,  $\epsilon = \epsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ,  $\mu = \mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ , 而在一般各向同性介质中,  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ,  $\mu = \mu_r \mu_0$ , 其中  $\epsilon_r$  称为相对介电常量,  $\mu_r$  称为相对磁导率。特别地,对于非均匀介质,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:

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

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,但是仍然是位置的函数。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  $\mathbf{H}$ ,可以得到如下只含一个未知量的二阶微分方程:

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

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

式中,  $\mathbf{J}_i$  是外加电流或源电流;  $\epsilon_c = \epsilon - j\sigma/\omega$  是感应电流  $\sigma \mathbf{E}$  和位移电流  $j\omega \mathbf{D}$  的综合贡献。

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,为了分析的方便,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以下三类:

(1) 第一类边界条件, 也称为 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, 可以为常数或零。

(2) 第二类边界条件, 也称为 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, 可以为常数或零。

(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。

#### 1.1.4 电磁波的传播

电磁波以波动的形式存在于空间中。微波能量在介质中依靠这种波动传播, 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介质中电磁波传播的最简单形式。均匀平面波的电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

$$E_x = E_0 e^{-jkz} \quad (1-1-18)$$

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

**有耗介质中的传播:** 当介质有极化损耗时, 介电常量为复数, 即

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1-1-19)$$

则传播常数为

$$k = \omega \sqrt{\mu(\epsilon' - j\epsilon'')} \quad (1-1-20)$$

当介质有导电性时, 设电导率为  $\sigma$ , 传播常数为

$$k = \omega \sqrt{\mu \left( \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right)} \quad (1-1-21)$$

可以看到, 在有损耗的介质中, 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  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \gg 1$  的良导体情况, 定义场的振幅衰减为初始值  $\frac{1}{e} \approx 0.369$  的距离,

为电磁波的透入深度或趋肤深度, 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。如果矢量尖端在一条直线上运动，就是线极化波。

如果矢量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 1-1-1 所示为电磁波的线极化和椭圆极化。

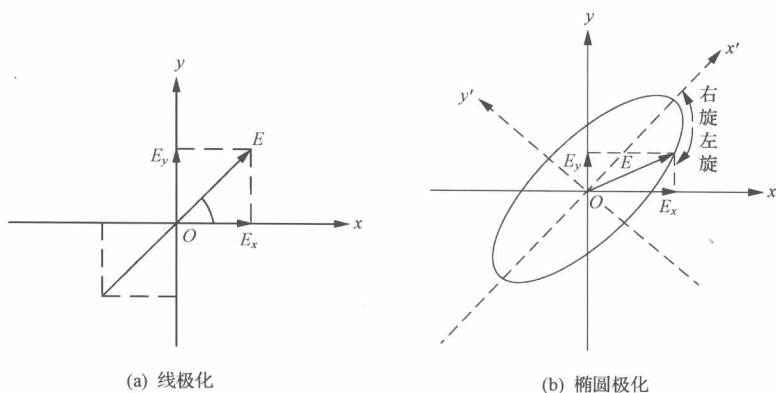


图 1-1-1 电磁波的线极化和椭圆极化

**坡印亭(Poynting)矢量：**时谐场的平均坡印亭矢量定义为

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \text{ W/m}^2 \quad (1-1-22)$$

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 1-1-2 所示)。

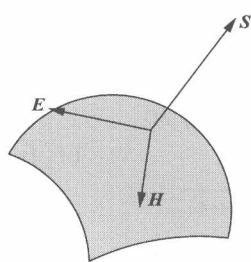


图 1-1-2 坡印亭矢量示意图

**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  $\hat{n}$  由区域 2 指向区域 1，则有如下边界条件：

$$\hat{n} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = 0 \quad (1-1-23)$$

$$\hat{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = \mathbf{J}_s \quad (1-1-24)$$

$$\hat{n} \cdot (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) = 0 \quad (1-1-25)$$

$$\hat{n} \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) = \rho_s \quad (1-1-26)$$

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，场只存在于一种介质中，则边界条件为

$$\hat{n} \times \mathbf{E} = 0 \quad (1-1-27)$$

$$\hat{n} \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_s \quad (1-1-28)$$

**辐射条件：**当电磁场所在区域延伸至自由空间的无穷远处时，为了得到问题的唯一解，在外边界处也必须确定一个条件，称为辐射条件，也称为索末菲尔德(Sommerfeld)辐

射条件, 写为

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \left[ \nabla \times \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{H}} + jk_0 \hat{\mathbf{r}} \times \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{H}} \right] = 0 \quad (1-1-29)$$

式中,  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 。

**反射和折射:** 电磁波在传播过程中如遇到介质界面时, 即介质的物理参数发生突变, 则产生反射与折射。入射波场与反射波场之和所形成的界面一侧的场与界面另一侧的折射场满足界面上的边界条件。

## 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, 其具体结构将在后文介绍。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。

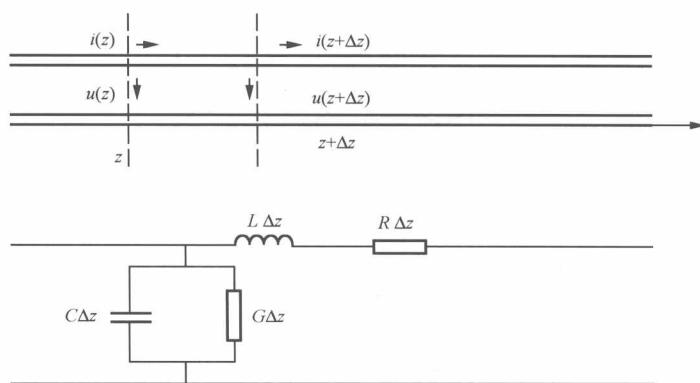


图 1-2-1 微波传输线的分布参数效应

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)描述如下:

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

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) 当传输线终端接其他一般负载时,传输线上波存在反射,称为行驻波状态,如图 1-2-2 所示。

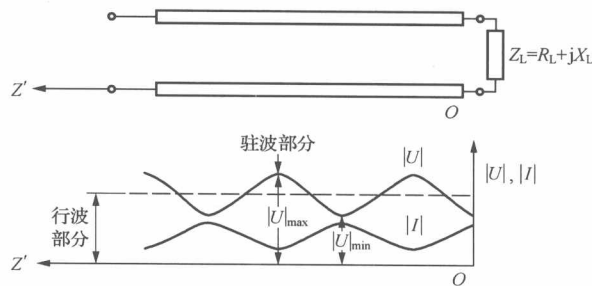


图 1-2-2 传输线的行驻波工作状态

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。

在图 1-2-3 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：

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

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

则 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

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

**【注意】** (1) 如果微波网络中只有各向同性的互易介质，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介质，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(包括几何对称和介质对称)，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  $[I] - [S]^+ [S] = 0$ 。

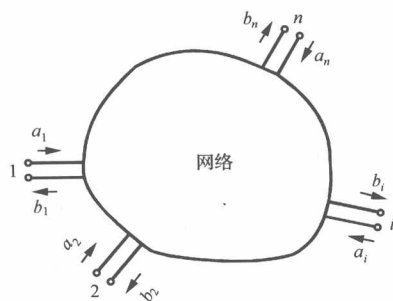


图 1-2-3 微波网络的 S 参数



(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 微波工程中的内问题

金属的边界条件或介质的界面条件能够将微波集中于一个相对封闭的区域, 实现导行波、滤波、定向传输、匹配、放大、混频等微波工程任务, 称为微波工程中的内问题。为了和本书介绍的软件相配合, 这里只介绍其中的无源问题。

#### 1.3.1 导波结构

与低频电路不同, 微波能量需要利用微波传输线传输。传输微波的具体传输线形式称为导波结构。导波结构包括三个大类:

第一类是传输横电磁波 ( $E_z = H_z = 0$ , 也称为 TEM 波) 的双导体传输线, 如平行双导线、同轴线、带状线、微带线和共面波导等。

第二类是传输色散的横电波 ( $E_z = 0$ , 也称为 TE 波) 或者横磁波 ( $H_z = 0$ , 也称为 TM 波) 的单导体传输线, 如矩形波导、圆波导、椭圆波导、脊波导和槽线等。

第三类是传输表面波的介质传输线, 如介质波导、光纤等。

如图 1-3-1 所示典型的导波结构。

