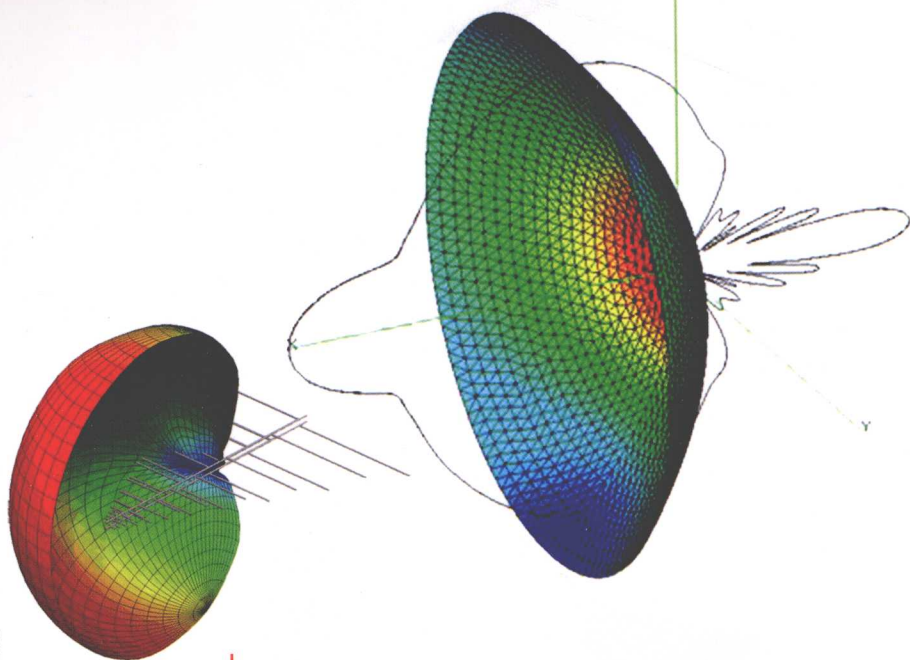


万水CAE技术丛书

ANSOFT HFSS



曹善勇 编著

Ansoft HFSS

磁场分析与应用实例

浓缩作者大量电磁场分析研发经验

重点讲解建立HFSS模型并进行微波电路和天线仿真分析

简要概述HFSS在信号完整性分析和电磁兼容中的应用

赠1CD



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水 CAE 技术丛书

Ansoft HFSS 磁场分析与应用实例

曹善勇 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要讲解在 HFSS 中建立微波电路分析和天线仿真分析, 然后简要讲述 HFSS 在信号完整性分析和电磁兼容中的应用。微波电路分析的类型包括魔 T、微带低通滤波器、SIR 微带带通滤波器、微带带阻滤波器、介质谐振器、微带耦合器等。天线仿真分析的类型包括对称振子天线、喇叭天线、贴片天线、测试吸收率装置和端射波导天线阵。在信号完整性分析中的应用包括低压差分信号差分线模型和非理想接地面模型。在电磁兼容中的应用包括屏蔽体模型和散热片模型。

本书编写时参考了大量的资料, 同时还结合作者大量实际分析案例来讲解, 层层深入到 HFSS 的高级应用。全书编写时, 采用大量的图片, 方便读者更快地掌握 HFSS 的使用方法, 本书的光盘配套有全书的所有例子, 方便读者学习。

本书适合有志于从事微波、天线设计工作的读者使用, 可作为初学 HFSS 的入门教材。

图书在版编目 (C I P) 数据

Ansoft HFSS 磁场分析与应用实例 / 曹善勇编著. —
北京: 中国水利水电出版社, 2010. 1
(万水 CAE 技术丛书)
ISBN 978-7-5084-7025-2

I. ①A… II. ①曹… III. ①电磁场—有限元分析—
应用软件, Ansoft HFSS IV. ①0441. 4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 217401 号

策划编辑: 杨元泓

责任编辑: 宋俊娥

封面设计: 李 佳

书 名	万水 CAE 技术丛书 Ansoft HFSS 磁场分析与应用实例
作 者	曹善勇 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京市天竺颖华印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 25 印张 618 千字
版 次	2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	58.00 元 (赠 1CD)

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

HFSS 广泛地应用于航空、航天、电子、半导体、计算机、通信等多个领域。它具备仿真精度高,可靠性强,仿真速度快,稳定成熟的特点,其自适应网格剖分技术使 HFSS 成为高频结构设计的首选工具和行业标准。利用 HFSS 工具可以高效地设计各种高频结构,包括射频和微波部件、天线和天线阵及天线罩,高速互连结构、电真空器件,可用于研究目标特性和系统/部件的电磁兼容/电磁干扰特性,从而降低设计成本,减少设计周期,增强竞争力。

本书主要讲解在 HFSS 中建立微波电路分析和天线仿真分析,然后简要讲述 HFSS 在信号完整性分析和电磁兼容中的应用。微波电路分析的类型包括魔 T、微带低通滤波器、SIR 微带带通滤波器、微带带阻滤波器、介质谐振器、微带耦合器等。天线仿真分析的类型包括对称振子天线、喇叭天线、贴片天线、测试吸收率装置和端射波导天线阵。在信号完整性分析中的应用包括低压差分信号差分线模型和非理想接地面模型。在电磁兼容中的应用包括屏蔽体模型和散热片模型。

本书适合有志于从事微波、天线设计工作的读者使用,可作为初学 HFSS 的入门教材。全书编写时,采用大量的图片,方便读者更快地掌握 HFSS 的使用方法,本书的光盘配套有全书的所有例子,方便读者学习。

本书共 8 章,第 1 章简要回顾了微波的相关理论,主要包括电磁场基本理论、微波电路理论和天线理论,然后讲述 HFSS 软件采用的算法——有限元法的基本原理。第 2 章主要讲解 HFSS 软件的特点和工作界面,然后通过微波电路中的一个简单器件——魔 T,讲述 HFSS 的建模、分析和查看结果的方法。第 3 章主要讲解使用 HFSS 进行建模和分析时依据的原理,如边界条件、激励、材料设置、求解设置、网格设定,最后讲解 HFSS 进行优化设计时依据的算法和优化判定条件。第 4 章主要讲解如何使用 HFSS 进行微波电路仿真分析,主要讲解微带低通滤波器、SIR 微带带通滤波器、微带带阻滤波器、介质谐振器、微波宽带功分器和微带耦合器。第 5 章主要讲解如何使用 HFSS 进行天线建模和仿真分析,主要讲解对称振子天线、喇叭天线、贴片天线、测试吸收率装置和端射波导天线阵。第 6 章主要讲解 HFSS 在信号完整性分析中的应用,主要讲解低压差分信号差分线模型和非理想接地面模型。第 7 章主要讲解 HFSS 在电磁兼容中的应用,主要讲解屏蔽体模型和散热片模型。第 8 章首先讲解 HFSS 中三种激励的区别以及三种求解算法的区别,然后讲解 HFSS 建模时的一些有用的规则,最后给出微波器件建模时的一些设计技巧,使读者能更快更好地建立微波器件模型。

本书在编写过程中参考了大量的国内外资料,并且融合了作者在电子科技大学大量的实际研发经验,结合大量实际分析案例来讲解,层层深入到 HFSS 的高级应用,以求最大限度地为读者提供实用的 HFSS 教程,帮助读者快速掌握 HFSS 电磁分析技术。

本书采用的天线术语均按照 IEEE (电气电子工程师协会) 有关天线术语的标准定义。附录光盘中有全书的所有 HFSS 模型,供读者学习、工作时参考。使用本节的读者应具备电磁场理论、微波技术基础和天线理论知识,最好具备矢量分析、三角函数与特殊函数、微积分和线性代数等数学基础。

本书由曹善勇编著,在编写过程中获得了电子科技大学的相关教师的帮助和指导。此外,

参与本书工作的还包括王斌、万雷、张强林、张赛桥、陈鲲、李晓宁、丁佳、虞志勇、吴艳、杜英、王晓、余松、夏慧军、陶林、许志清、赵会春等。本书编写过程中参考了大量的优秀教材，在此表示感谢。

需要指出，本书力求详尽地解释利用 HFSS 进行电磁场分析的步骤及需考虑的关键因素，并提供了所有实例的模型文件。但由于时间仓促，作者水平有限，书中难免有错漏之处，恳请广大读者批评指正。若有问题请发邮件到 sharepub@126.com 联系。

编者

2009年12月

目 录

前言

第 1 章 微波理论基础	1	2.4.3 活动光标	40
1.1 电磁场基本理论	1	2.4.4 创建并查看简单结构	40
1.1.1 麦克斯韦方程组	1	2.4.5 画图概述	42
1.1.2 时谐场的麦克斯韦方程组	2	2.4.6 选择之前定义的形状	44
1.1.3 波动方程及其边界条件	2	2.4.7 改变视角	47
1.2 微波电路基本理论	3	2.4.8 应用结构的转换	48
1.2.1 传输线理论	3	2.4.9 通过布尔运算组合物体	49
1.2.2 微波网络理论	5	2.4.10 局部坐标系	49
1.2.3 平面传输线与波导传输线	6	2.4.11 几何参数	51
1.3 天线基本理论	10	2.5 魔 T 设计快速上手实例	52
1.3.1 电磁波的传播	10	2.5.1 Ansoft HFSS 设计环境	52
1.3.2 天线原理	11	2.5.2 启动 Ansoft HFSS	53
1.3.3 电磁散射	13	2.5.3 设置工具选项	54
1.4 电磁兼容问题	14	2.5.4 如何打开一个新工程	55
1.5 有限元法基本原理	14	2.5.5 如何设置解决方案类型 (Set Solution Type)	55
1.5.1 有限元方法的原理	14	2.5.6 建立 3D 模型	55
1.5.2 三维时谐场有限元问题	17	2.5.7 建立波导端口激励	58
1.5.3 有限元方程组的求解	21	2.5.8 边界显示	62
1.6 电磁内问题和外问题的不同处理	23	2.5.9 分析设置	62
1.7 本章小结	24	2.5.10 保存工程	63
第 2 章 HFSS 快速上手	25	2.5.11 分析	64
2.1 HFSS 的特点和应用领域	25	2.5.12 生成报表	65
2.2 HFSS 与其他软件的协同作业	25	2.6 本章小结	70
2.3 熟悉 HFSS 工作环境	26	第 3 章 HFSS 仿真分析基础	71
2.3.1 菜单栏	27	3.1 边界条件设置	71
2.3.2 工具栏	33	3.1.1 背景	72
2.3.3 状态栏	36	3.1.2 理想导体边界	72
2.3.4 Project Manager 窗口	36	3.1.3 理想磁边界	73
2.3.5 Properties 窗口	37	3.1.4 辐射边界	74
2.3.6 进度窗口	37	3.1.5 理想匹配层 (Perfect Match Layer)	74
2.3.7 信息管理窗口	37	3.1.6 有限导体边界	75
2.3.8 3D 模型窗口	37	3.1.7 阻抗边界	76
2.4 参数化建模	38	3.1.8 对称边界	76
2.4.1 模型编辑器用户界面	38		
2.4.2 网格平面	39		

3.1.9 主从边界	78	4.1 微带低通滤波器设计	111
3.1.10 集总RLC边界	79	4.1.1 基本原理	111
3.1.11 分层阻抗边界	80	4.1.2 问题描述和分析思路	111
3.1.12 无限大地平面	81	4.1.3 参数设定	112
3.2 激励设置	82	4.1.4 创建三维模型	115
3.2.1 波端口	82	4.1.5 设置分析	124
3.2.2 波端口激励	85	4.1.6 计算结果的评价	125
3.2.3 集总端口激励	86	4.2 SIR微带带通滤波器设计	127
3.2.4 差分对激励	87	4.2.1 基本原理	127
3.2.5 磁偏置源激励	88	4.2.2 问题描述和分析思路	128
3.2.6 照射波激励	89	4.2.3 参数设定	130
3.3 材料设置	90	4.2.4 创建三维模型	131
3.3.1 相对磁导率	91	4.2.5 设置分析	145
3.3.2 相对介电常数	91	4.2.6 计算结果的评价	146
3.3.3 电导率	91	4.3 微带带阻滤波器设计	152
3.3.4 介质损耗角正切	92	4.3.1 基本原理	152
3.3.5 磁损耗角正切	92	4.3.2 问题描述和分析思路	154
3.3.6 各向异性材料	92	4.3.3 参数设定	155
3.4 求解设置	95	4.3.4 创建三维模型	155
3.4.1 输入输出端口的处理	95	4.3.5 分析设置	168
3.4.2 自适应分析过程	97	4.3.6 计算结果的评价	169
3.4.3 单个频率的解和扫频解	99	4.4 介质谐振器设计	174
3.4.4 HFSS中求解方法的类型	100	4.4.1 基本原理	174
3.4.5 电磁场矢量的求解	101	4.4.2 问题描述和分析思路	175
3.4.6 特性阻抗的计算	102	4.4.3 参数设定	177
3.4.7 阻抗乘法器的使用	103	4.4.4 创建三维模型	177
3.5 网格设定	104	4.4.5 设置分析	183
3.5.1 手动设置网格	104	4.4.6 计算结果的评价	184
3.5.2 表面近似设置	106	4.5 微波宽带功分器设计	192
3.6 优化计算功能	107	4.5.1 基本原理	192
3.6.1 优化方法	107	4.5.2 问题描述和分析思路	193
3.6.2 优化变量和设计空间	107	4.5.3 参数设定	194
3.6.3 目标函数	108	4.5.4 创建三维模型	195
3.6.4 线性约束	108	4.5.5 设置分析	212
3.6.5 目标权值	108	4.5.6 计算结果的评价	213
3.6.6 优化计算中的步长	109	4.6 微带耦合器设计	216
3.6.7 敏感性分析	109	4.6.1 基本原理	216
3.6.8 调谐分析	110	4.6.2 问题描述和分析思路	217
3.7 本章小结	110	4.6.3 参数设定	218
第4章 微波电路仿真分析	111	4.6.4 创建3D模型	218

4.6.5 设置分析	225	5.6 本章小结	320
4.6.6 计算结果的评价	226	第 6 章 HFSS 信号完整性分析	321
4.7 本章小结	232	6.1 低压差分信号 (LVDS) 差分线	321
第 5 章 天线仿真分析	233	6.1.1 基本原理	321
5.1 对称振子天线	233	6.1.2 问题描述和分析思路	322
5.1.1 基本原理	233	6.1.3 参数设定	323
5.1.2 问题描述和分析思路	234	6.1.4 创建三维模型	325
5.1.3 参数设定	235	6.1.5 设置分析	332
5.1.4 建立 3D 模型	237	6.1.6 计算结果的评价	334
5.1.5 设置分析	247	6.2 非理想接地面	341
5.1.6 计算结果的评价	249	6.2.1 基本原理	342
5.2 喇叭天线	253	6.2.2 问题描述和分析思路	343
5.2.1 基本原理	253	6.2.3 参数设定	343
5.2.2 问题描述和分析思路	253	6.2.4 创建三维模型	344
5.2.3 参数设定	254	6.2.5 设置分析	353
5.2.4 建立 3D 模型	255	6.2.6 计算结果的评价	355
5.2.5 设置分析	265	6.3 本章小结	357
5.2.6 计算结果的评价	266	第 7 章 HFSS 在电磁兼容中的应用	358
5.3 微带贴片天线	268	7.1 屏蔽体	358
5.3.1 基本原理	269	7.1.1 基本原理	358
5.3.2 问题描述和分析思路	270	7.1.2 问题描述和分析思路	359
5.3.3 参数设定	271	7.1.3 参数设定	359
5.3.4 建立 3D 模型	272	7.1.4 创建三维模型	361
5.3.5 设置分析	280	7.1.5 设置分析	371
5.3.6 计算结果的评价	281	7.1.6 计算结果的评价	372
5.4 吸收率测试模型	284	7.2 散热片	376
5.4.1 基本原理	284	7.2.1 基本原理	376
5.4.2 问题描述和分析思路	284	7.2.2 问题分析	376
5.4.3 参数设定	285	7.2.3 参数设置	377
5.4.4 创建 3D 模型	286	7.2.4 创建三维模型	378
5.4.5 设置分析	299	7.2.5 设置分析	383
5.4.6 计算结果的评价	300	7.2.6 计算结果的评价	384
5.5 端射波导天线阵	304	7.3 本章小结	386
5.5.1 基本原理	304	第 8 章 HFSS 分析技巧	387
5.5.2 问题描述和分析思路	305	8.1 求解模式的区别	387
5.5.3 参数设定	306	8.2 关于求解的设置	388
5.5.4 创建 3D 模型	307	8.3 HFSS 建模规则	389
5.5.5 设置分析	314	8.4 HFSS 建模需知	389
5.5.6 计算结果的评价	315	参考文献	392

第 1 章 微波理论基础

电磁场理论是解决一切微波、射频问题的基础。本章首先介绍电磁场基本理论，着重介绍麦克斯韦方程组，然后介绍微波电路中的传输线理论及微波网络理论，天线基本理论，基本的电磁兼容原理，有限元法。

本章要点：

- 电磁场基本理论
- 微波电路基本理论
- 天线基本理论
- 电磁兼容问题
- 有限元法基本原理
- 电磁内问题和外问题的不同处理

1.1 电磁场基本理论

传统上，微波或射频指的是 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 Maxwell（麦克斯韦）方程组的求解问题。本章中简要给出射频工程涉及到的基本电磁场知识。

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：

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

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

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

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

其中， E 、 B 、 H 、 D 、 J 和 ρ 都是位置 (r) 与时间 (t) 的时变函数，其名称和单位如下：

$E(r,t)$ ——电场强度 (V/m)；

$B(r,t)$ ——磁通量密度 (Wb/m²)；

$H(r,t)$ ——磁场密度 (A/m);

$D(r,t)$ ——电位移 (C/m²);

$J(r,t)$ ——电流密度 (A/m²);

$\rho(r,t)$ ——电荷密度 (C/m³);

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

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

麦克斯韦方程组的前两个方程分别为法拉第定律和安培环路定律;后两个方程分别称为高斯定律和磁场高斯定律。

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (1-6)$$

$$B = \mu \cdot H \quad (1-7)$$

$$J = \sigma \cdot E \quad (1-8)$$

式(1-6)到式(1-8)中,参数 ε 、 μ 和 σ 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媒质,这些本征参数退化为标量。在自由空间中 $\varepsilon = \varepsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12}$ (F/m), $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m);而在一般的各向同性媒质中 $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$, $\mu = \mu_r \mu_0$, 其中 ε_r 称为相对介电常数, μ_r 称为相对磁导率。特别地,对于非均匀媒质,本征参数是位置的函数。

1.1.2 时谐场的麦克斯韦方程组

如果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:

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

因此,可以采用这种关系,给出式(1-1)~(1-4)的时谐场表达式:

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

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

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

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

1.1.3 波动方程及其边界条件

在式(1-10)到式(1-13)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。在式(1-10)和式(1-11)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。

根据(1-6)到式(1-8)给出的本征关系,联立式(1-10)和式(1-11)并从中消去电场强度 E 和磁场强度 H , 得到只含一个未知量的二阶微分方程:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times E \right) - \omega^2 \varepsilon_c E = -j\omega_c J_i \quad (1-14)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon_c} \nabla \times H \right) - \omega^2 \varepsilon_c H = \nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon_c} J_i \right) \quad (1-15)$$

式中, J_i 是外加电流或源电流, $\varepsilon_c = \varepsilon - j\sigma/\omega$ 是感应电流 σE 和位移电流 $j\omega D$ 的综合贡献, 这里 σ 表示媒质的电导率。

式 (1-14) 和式 (1-15) 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, 即式 (1-14) 和式 (1-15) 的右端不为 0 时, 称为非齐次矢量波动方程。

(2) 在外加激励为零时, 即式 (1-14) 和式 (1-15) 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) 为了分析方便, 在电磁工程中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), 则式 (1-14) 和式 (1-15) 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, 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 Γ 包围的区域 Ω 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:

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

式中, Γ_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:

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

式中, Γ_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 微波电路基本理论

本节主要介绍微波电路理论中的传输线理论和微波网络理论。传输线理论是微波电路设计和计算的理论基础。传输线理论在电路理论与场的理论之间起着桥梁作用, 在微波网络分析中也相当重要。微波网络由分布参数电路和集总参数网络组合而成。分布参数电路由组成微波电路或系统的规则导行系统等效而成, 集总参数网络则由微波电路或系统中的不连续性等效而成。

1.2.1 传输线理论

微波传输线可以传输微波信号。与低频传输线不同, 微波传输线具有分布参数效应, 如图 1-1 所示, 对于均匀传输线, 取其一无限小线元 Δz ($\Delta z \ll \lambda$), 则此线元可视为集总参数电路, 其上有电阻 $R\Delta z$ 、电感 $L\Delta z$ 、电容 $C\Delta z$ 和漏电导 $G\Delta z$ 。

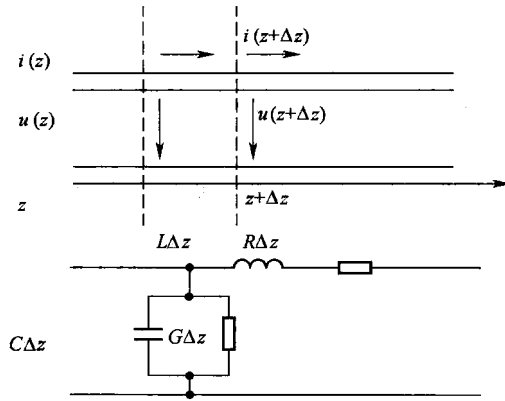


图 1-1 微波传输线的分布参数效应

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：

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial z} = R_i + L \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial z} = Gu + C \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (1-18)$$

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。其通解一般可以表示为：

$$u(z) = u^+ e^{-j\beta z} + u^- e^{j\beta z} \quad (1-19)$$

$$i(z) = \frac{1}{Z_0} (u^+ e^{-j\beta z} - u^- e^{j\beta z}) \quad (1-20)$$

式中， β 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：从式 (1-19) 和式 (1-20) 中可以看到，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 Γ 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，此时传输线上的波没有反射，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 所示，既存在驻波部分，又存在行波部分。

除了反射系数 Γ 这个重要的参数外，驻波比 ρ （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 ρ ：传输线上电压模值的最大值 ($|U|_{\max}$) 和最小值 ($|U|_{\min}$) 之比，如图 1-2 所示。显然，驻波比 ρ 的取值为 $[1, \infty)$ ，在行波状态下为 1，在驻波状态下为 ∞ 。

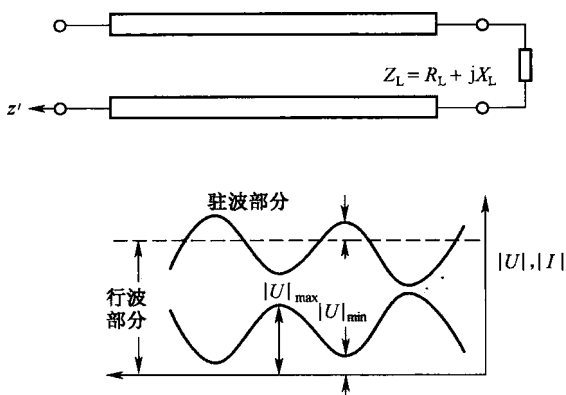


图 1-2 传输线的行驻波状态

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 1-1 所示。

表 1-1 反射系数、阻抗和驻波系数之间的关系

	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}$
$Z(z)$	$Z(z) = Z_0 \frac{1 + \Gamma(z)}{1 - \Gamma(z)}$	$Z(z) = \frac{U(z)}{I(z)} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \theta}{Z_0 + jZ_L \tan \theta}$	$Z(z) = \frac{1 + j\rho \tan \beta(z + \Delta z)}{\rho + j \tan \beta(z + \Delta z)}$
ρ	$\rho = \frac{1 + \Gamma(z) }{1 - \Gamma(z) }$	$\rho = \frac{\sqrt{(R_L + Z_0)^2 + x_L^2} + \sqrt{(R_L - Z_0)^2 + x_L^2}}{\sqrt{(R_L + Z_0)^2 + x_L^2} - \sqrt{(R_L - Z_0)^2 + x_L^2}}$	$\rho = \frac{ U(z) _{\max}}{ U(z) _{\min}}$

从表 1-1 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 Γ_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 Δz 是等效长度，与负载的相位有关。

1.2.2 微波网络理论

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，网络方法关心的更多是微波问题呈现的外部特性。电磁场论和网络方法代表不同的两个方面：场是网络的内部原因，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 参数进行描述，如图 1-3 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。

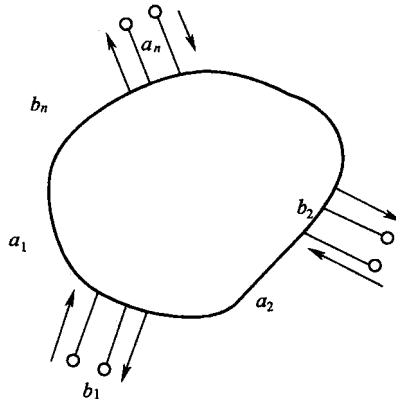


图 1-3 微波网络的 S 参数

$$a = \frac{u^+ e^{-j\beta z}}{Z_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{u}{\sqrt{Z_0}} + i\sqrt{Z_0} \right) \quad (1-21)$$

$$b = \frac{u^- e^{j\beta z}}{Z_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{u}{\sqrt{Z_0}} - i\sqrt{Z_0} \right) \quad (1-22)$$

上式中， 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：

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \quad (1-23)$$

注意：

(1) 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： $S_{ii} = S_{jj}$ 。

(2) 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： $S_{ij} = S_{ji}$ 。

(3) 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

匹配负载时端口一的反射系数。

(4) 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 $I - S^+ S = 0$ 。

1.2.3 平面传输线与波导传输线

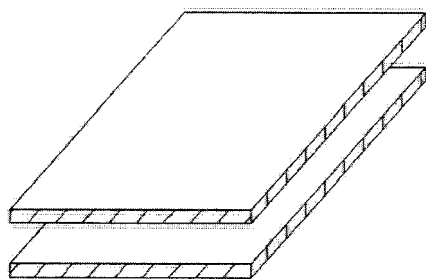
微波能量需要利用微波传输线进行传输。传输微波的具体传输线形式称为导波结构。导波结构包括三个大类：

第一类是传输横电磁波 ($E_z = H_z = 0$, 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。

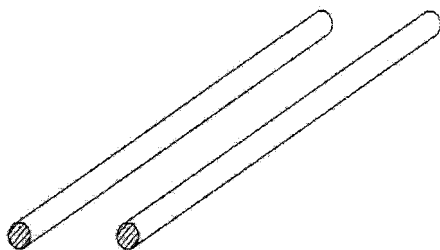
第二类是传输色散的横电波 ($E_z = 0$, 称为 *TE* 波) 或者横磁波 ($H_z = 0$, 称为 *TM* 波) 的单导体传输线, 如矩形波导、圆波导、椭圆波导、脊波导和槽线等。

第三类是传输表面波的介质传输线, 如介质波导、光纤等。

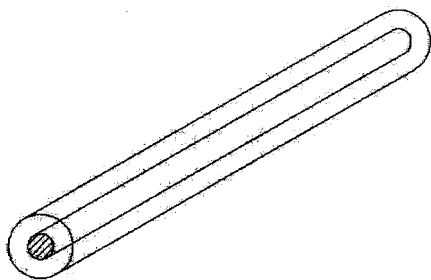
典型的导波结构如图 1-4 所示。



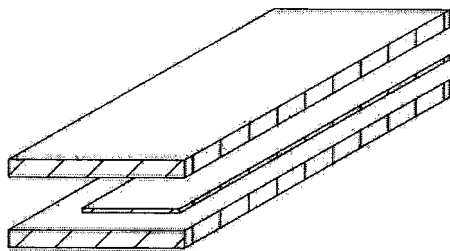
平行板传输线



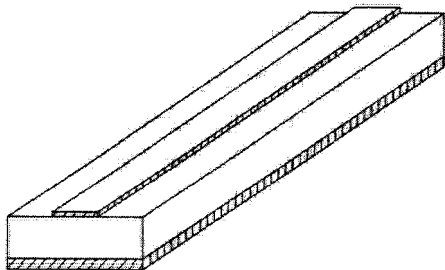
双导线传输线



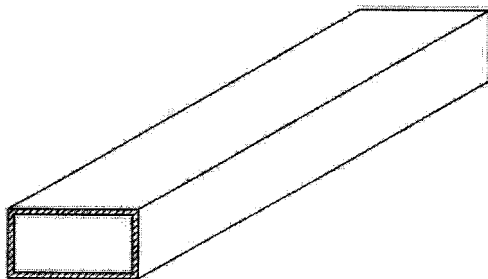
同轴线



带状线



微带线



矩形波导

图 1-4 典型的微波传输线结构

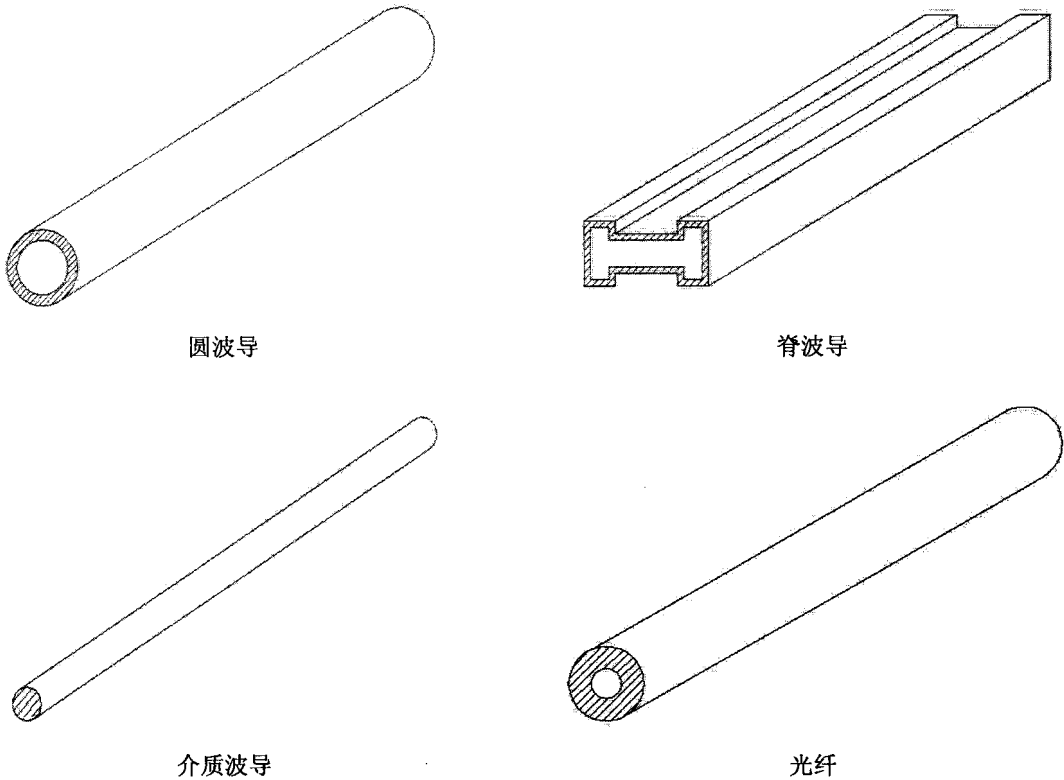


图 1-4 典型的微波传输线结构 (续)

在导波结构中传输的 TEM 波、 TE 波和 TM 波经过适当的等效, 都可以适用前文介绍的传输线理论。因此, 前文介绍的波的反射系数、驻波比等概念仍然是导波结构中的主要概念, 而且在 TEM 波传输线中, 特性阻抗是最重要的分析和设计内容之一。

微波在某个特定的导波结构中是以模式的形式存在的。模式是麦克斯韦方程组在这种导波结构横截面中的本征解, 所以也称为本征模。 TE 模式和 TM 模式一般带有两个下标记号, 分别用来对应相应的本征模。其相应的本征值是横向的本征谐振频率, 对应该模式的截止频率。

模式的截止频率是导波理论中非常重要的一个概念, 微波只有工作在某个模式的截止频率以上 (对应工作在其截止波长之下), 才有可能以该模式的形式传输。换句话说, 这个模式在这种导波结构中的传播常数是实数, 称为传输模。否则, 这个模式在这种导波结构中的传播常数是虚数, 称为凋落模。微波能量可以以传输模的形式在导波结构中传输。

因此, 一个导波结构中的本征模对应的截止频率可以排成一个序列, 最低截止频率对应的模式称为主模, 第二个最低截止频率对应的模式称为次高模。如果只希望导波以主模形式传输, 则其工作频率应选在主模和次高模的截止频率 (或截止波长) 之间。

一般导波结构都设计为主模工作, 即除了主模外, 其他模式均为凋落模。主模式在导波结构中传播时, 除了 TEM 波外, 其呈现的等效波长一般不等于工作波长。

下面简要介绍一些典型的导波结构的工作原理和设计要点。

1. 同轴线

同轴线由同心的内、外金属导体组成, 如图 1-4 所示。同轴线中可以传输 TEM 模, 也可

以传输 TE 模和 TM 模。

同轴线的主模式为 TEM 模，其截止频率为 0 Hz（对应截止波长为 ∞ ）。也就是说，任何频率的微波都可以在同轴线中以 TEM 模传输。

如果设同轴线外导体的内半径为 b ，内导体的外半径为 a ，两导体间填充介质的相对介电常数为 ϵ_r ，则其特性阻抗为：

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (1-24)$$

为了保证其中的 TEM 模单模工作，其微波的工作波长应满足条件： $\lambda > \pi(a+b)$ 。

2. 矩形波导

矩形波导是中空的矩形截面的金属导体管，如图 1-4 所示。矩形波导可以传输 TE 模和 TM 模，其主模式为 TE_{10} 模。

如果设矩形波导的宽边长度为 a ，窄边长度为 b （一般选择略小于 $a/2$ ），则 TE_{10} 模的截止波长为 $2a$ ，次高模为 TE_{20} 模（其截止波长为 a ）。主模 TE_{10} 模单模工作时，其工作波长范围为： $a < \lambda < 2a$ 。

TE_{10} 模电磁波在波导中传播时，其等效波长不同于自由空间情况，称为波导波长，其与工作波长的关系为：

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (1-25)$$

3. 圆波导

圆波导是中空的圆截面的金属导体管，如图 1-4 所示。圆波导中可以传输 TE 模和 TM 模，其主模式为 TE_{11} 模。

如果设圆波导内壁的半径为 R ，则 TE_{11} 模的截止波长为 $3.41R$ ，次高模为 TM_{01} 模（其截止波长为 $2.62R$ ）。主模 TE_{11} 模单模工作时，工作波长范围为： $2.62R < \lambda < 3.41R$ 。

TE_{11} 模电磁波在波导中传播时，其等效波长不同于自由空间情况，称为波导波长，其与工作波长的关系为：

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{3.412R}\right)^2}} \quad (1-26)$$

4. 微带线

微带线由金属底板、相对介电常数为 e 的介质基片和金属导带组成，如图 1-4 所示。一般，如果金属导带的宽度 w 比基片厚度 h 大，则称为宽微带，否则称为窄微带。

微带线是可以传输 TEM 模式的双导体结构。但是，因为其结构的不对称性，所以微带线中传输的主模是准 TEM 模，其特性阻抗的求解公式较为复杂，单模工作的频率限制是：

$$f_0 < \frac{75}{h\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad (1-27)$$

$$f_0 < \frac{106}{h\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad (1-28)$$