



高等学校教材

# 微波技术基础

全绍辉 编著

高等学校教材

# 微波技术基础

Weibo Jishu Jichu

全绍辉 编著



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容简介

本书所面向的课程是“微波技术”。本书在内容上充分考虑了“微波技术”课程在电子信息工程知识体系中的定位及与先修课程“电路分析”、“电磁场理论”、“信号与系统”的衔接,对三门课程的知识都有进一步延伸、补充和深化。

绪论 介绍了微波定义、微波技术定义、发展历史、学习的必要性和重要性、课程定位、内容安排、微波的一些特点和应用。第一章 电磁场和电磁波基础是对先修课程“电磁场理论”相关知识针对微波技术学习要求的总结和提炼。第二章 传输线理论、第三章 波导理论、第四章 微波网络、第五章 微波元件是本书的核心和特色内容,完整、系统、详细地讲授了微波技术基础理论。第六章 微带传输线定位于前五章基础概念、理论针对实际工程应用的一个实例,以此作为全书总结,可进一步拓展与后续课程及科研工程实践接轨的专题。

本书编写特别注意了全书知识体系的系统性、完整性、科学性、教学适用性、规范性、易读性。全书符号规范、讲授思路清晰,并配有循序渐进、针对性强的例题、习题(附部分习题答案),非常适合初学者阅读。

本书可作为高等学校电子信息类、通信工程类专业本科生的“微波技术”课程教材,也可供电磁、射频、微波、天线等专业的教师、研究生、科研和工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

微波技术基础/全绍辉编著. —北京:高等教育出版社, 2011.4

ISBN 978-7-04-031599-8

I. ①微… II. ①全… III. ①微波技术-高等学校-教材 IV. ①TN015

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第017693号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 魏芳 封面设计 张楠 责任绘图 尹莉  
版式设计 余杨 责任校对 陈旭颖 责任印制 尤静

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120

经销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印刷 北京铭成印刷有限公司

开本 787 × 1092 1/16  
印张 23.5  
字数 570 000  
插页 1

购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598  
网址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 2011年4月第1版  
印次 2011年4月第1次印刷  
定价 37.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 31599-00

# 前 言

北京航空航天大学电磁场与微波技术学科是国家级重点学科和国防重点学科,“微波技术”课程是该学科的一门专业基础课,目前已经发展成为电子信息工程学院的核心课和北京航空航天大学精品课。

另一方面,随着射频和微波技术的广泛应用,北京航空航天大学或其他相近工院校的“微波技术”课程通常要求面向全部电子信息类、通信工程类专业开设,因此,如何把握微波技术教学的广度和深度是教学中需要考虑的问题。以北京航空航天大学为例,目前“微波技术”课程教学规定为52学时(不含实验),在有限学时条件下,如何通过教学使学生对射频和微波基础知识的掌握达到一个相对完备的状态,既可以面向初步应用,同时又不失电磁场与微波技术理论的严谨性、规范性,可以为进一步在本专业深造奠定良好基础,是编著者在教学过程中一直追求的目标。

编著者认为,“微波技术”课程的定位应该是:①“电路分析”、“电磁场理论”、“信号与系统”等课程的延伸课;②关于射频和微波新现象、新概念、新理论的知识扩展课;③电子信息类、通信工程类所有专业必须掌握的专业基础课;④进行深入电子科学与技术科学领域研究的必修课;⑤电磁场与微波技术等专业的从业人员,包括射频工程师、微波工程师、天线工程师等的入门课。

编著者基于上述课程定位,并结合多年教学实践,编写了本书。书中内容不追求多而全,而是定位少而精,希望对入门基础知识的细节讲通讲透,达到讲少学多的效果。本书有以下特色。

## 1. 标准、规范的符号体系。

因为各种电磁场与微波技术书籍符号系统经常不统一,甚至出现混淆,这已经成为学生理解和学习知识的障碍,所以本书选择了一套相对合理、规范的符号系统,并注意解释、说明、强调各种符号的使用条件和转换关系,及前后章节符号的关联和一致性。

目前大部分出版物仅用黑斜体表示矢量,对复矢量一般不再区分,这种表示方法易造成理解和使用中的混淆,影响学习效果。本书对全部矢量均保留了箭头符号,对复矢量在箭头上再加一点以示区别。这种表示方法使得各符号物理意义更清楚,易于书写,方便辨识,并和教师授课及学生手写的习惯一致,因而更方便、更实用,且更严谨、更严格,不容易出错。

## 2. 强调基本概念、基本理论和整体思路的把握和学习。

射频和微波技术的发展已经使得“微波技术”课程成为电子信息类、通信工程类专业的必修课。为满足这一教学要求,本书在编写上尽量摒弃一些难深晦涩的知识点,重点强调基本概念、基本理论和整体思路的把握和学习。本书注意知识的层层递进、由浅入深,并适当总结和提示,使学生不至于陷入具体的公式推导细节中不能自拔,而忽略了对整体知识结构的

## II 微波技术基础

把握。

### 3. 长线理论、波导理论、网络理论的详细讲解。

长线理论通常作为“微波技术”课程的入门知识，以“路”的理论为主；波导理论是“微波技术”课程的特色内容，以“场”的理论为主；微波网络则综合了低频网络理论、长线理论和波导理论的内容，从“场”的理论又返回到“路”的理论。三部分内容都涉及大量关于微波工程的基本概念和理论，是学习的重点和难点。本书用了大量篇幅讲授这三部分内容，力求做到对基本概念介绍较清楚和完整，分析求解思路清晰。通过在各章节配备适量的例题，使初学者可以顺利完成低频电路和微波电路、路的理论和场的理论之间的过渡。

### 4. 路、场、系统三者结合的讲授方法。

除讲授传统“微波技术”课程所包括的长线理论(基于路的方法研究传输线)、波导理论(基于场的方法研究传输线)外，本书更注重建立二者之间的关系，包括：微波等效电路原理和方法的深入学习，从电磁场和能的角度定义相关电路参数，将传输线上的电压波、电流波与自由空间和波导中的电磁波进行类比，等等。

另外，从系统的观点看，传输线或波导又可以等效为一个线性系统。本书引入了信号与系统的观点，对比学习了如色散、群延迟等概念。希望可以抛砖引玉，引导读者从路、场、系统的不同视角去认识和理解同一物理现象。

### 5. 循序渐进、针对性强的例题、习题及配套的课程资源建设。

本书对每一节教学内容都配备了适量的例题和课后习题，并尽量使所选题目难度适中，题目之间知识点连续，过渡性强，使读者可以得到全方位、有针对性的练习，循序渐进掌握知识。为了便于读者自学和自查，本书附有部分习题答案。另外，本书还有配套的电子版课件及与本书互补的微波技术基础概要、答疑、题解和实验等辅助材料，可通过编著者 E-mail: EIE205@sina.com 索取或在 <http://jpk.buaa.edu.cn>、<http://ee.cncourse.com> 上下载。

### 6. 适合自学，方便查阅。

本书全部内容均来自编著者课堂教学讲稿或讲义，特别注意了全书知识体系的完整性，所以非常适合读者自学。为便于读者学习和查阅，本书在每一章均编写了“本章导读”和“本章总结”，并在正文前编写了“部分符号含义表”，在附录中编写了课程相关基本概念和名词索引。基于上述特点，本书也适合射频、微波、天线等专业的科研和工程人员作为工具书查阅。

本书前五章内容参考教学学时为 52 学时，具体为：绪论和第一章 2~4 学时，第二章 14 学时，第三章 14 学时，第四章 10 学时，第五章 6 学时，课程总结、复习 4~6 学时。

根据编著者的实际教学经验，对基础较好的学生，前五章的基本内容也可以在 40 学时以内完成(绪论和第一章 2 学时，第二章 12~14 学时，第三章 12 学时，第四章 8 学时，第五章 4 学时)。

本书第六章 微带传输线可作为选学内容。完整讲授第六章需要安排 4~6 学时，可以考虑用微带传输线部分替换掉前五章的课程总结、复习。如果仅是希望对微带线相关基本概念和理论有初步了解，则可将该章部分选取内容放在第三章 波导理论和第四章 微波网络之间讲授，安排 1~2 学时。

将微带传输线部分放在最后一章有三方面考虑：第一，不学习微带传输线并不会影响读者

学习前五章内容,即不会影响微波技术基础理论学习的完整性。第二,本书希望将微带传输线相关内容定位于前五章基础概念、理论的一个应用实例,以此说明实际中所有其他类型传输线都可以在一定程度上用与前五章类似的方法进行分析。第三,考虑到微带传输线在实际中具有广泛的科研和工程应用,教学中可以将本章进一步拓展为与微波技术课程和后续课程以及科研工程实践接轨的专题,专门安排一些仿真、设计和实践的大作业,提高学生解决实际问题的能力。如果学时不够,微带传输线内容也可安排在课程设计、暑期实习阶段完成。

在本书完成之际,特别要感谢杨晓琳、刘西柯、石磊、于同飞、刘琳、刘庆辉、樊勇、夏丰、李栋、石鑫、高成韬、赵英华、王正鹏、万亮等研究生为本书初稿的形成、编辑和修改所付出的辛勤工作。

感谢何国瑜教授、吕善伟教授、熊庆旭教授、张有光教授、苗俊刚教授、白明副教授、邓晖副教授、武建华等对本书初稿提出的中肯意见和建议。

感谢董金明教授、林萍实副教授等前辈教师在微波技术教学中曾经给予编著者的无私帮助和指导。

同时,非常感谢本书评审专家焦其祥教授、何国瑜教授、吕善伟教授的细心评阅和建设性的意见,令编著者受益匪浅。

另外,本书的编写和出版得到北京航空航天大学“十一五”规划教材立项、北京航空航天大学研究生精品课程建设项目、国家自然科学基金项目(60771011)的资助,特此致谢。

编著者热切希望通过本书与广大读者交流微波技术的学习和教学方法,共同促进和提高微波技术的学习和教学质量。由于编著者水平有限,本书难免存在一些缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

编著者

2010年11月

# 部分符号含义表

## 第一章

$\vec{E}$ : 电场强度

$\vec{H}$ : 磁场强度

$\vec{D}$ : 电通密度

$\vec{B}$ : 磁通密度

$\vec{J}$ : 电流密度

$\rho$ : 电荷密度

$\epsilon_0$ : 真空中介电常数

$\mu_0$ : 真空中磁导率

$\sigma$ : 电导率

$\vec{j}_c$ : 传导电流密度

$\vec{P}$ : 极化强度

$\vec{M}$ : 磁化强度

$\vec{j}_p$ : 极化电流密度

$\vec{j}_m$ : 磁化电流密度

$\tau$ : 弛豫时间

$\rho_m$ : 磁化电荷密度

$\rho_f$ : 自由电荷密度(对应传导电流)

$\rho_p$ : 极化电荷密度

$\rho_f$ : 自由电荷密度

$\vec{j}_f$ : 自由电流密度

$\vec{K}$ : 面电流密度

$\eta$ : 面电荷密度

$\vec{K}_M$ : 面磁流密度

$\eta_M$ : 面磁荷密度

$\nabla_{\Sigma}$ : 面散度运算符

$\vec{K}_f$ : 面自由电流密度

$\eta_f$ : 面自由电荷密度

$\epsilon$ : 媒质介电常数或电容率

$\mu$ : 媒质磁导率或电感率

$v$ : 媒质中波速

$\dot{\vec{E}}$ : 复电场强度

$\dot{\vec{H}}$ : 复磁场强度

$\dot{\vec{D}}$ : 复电通密度

$\dot{\vec{B}}$ : 复磁通密度

$\dot{\vec{J}}$ : 复电流密度

$\dot{\rho}$ : 复电荷密度

$\epsilon$ : 媒质复介电常数

$\mu$ : 媒质复磁导率

$\delta$ : 电介质损耗角

$\delta_m$ : 磁介质损耗角

$k$ : 媒质波数

$\beta$ : 相位常数

$\alpha$ : 衰减常数

$\vec{k}$ : 传播矢量或波矢量

$\psi(z, t)$ : 时域传播因子

$v_p$ : 相速度

$\lambda_p$ : 相波长

$v_g$ : 群速度

$\tau_g$ : 群延迟

$\eta$ : 媒质波阻抗

$\eta_{\perp}$ : 垂直极化波波阻抗

$\eta_{\parallel}$ : 平行极化波波阻抗

$\langle P(t) \rangle / P$ : 瞬时功率时间平均

$\vec{S}$ : 坡印亭矢量

$\langle \vec{S}(\vec{r}, t) \rangle$ : 瞬时坡印亭矢量时间平均值

$\langle W_e(t) \rangle$  或  $W_e$ : 平均电能

$\langle W_m(t) \rangle$  或  $W_m$ : 平均磁能

$\dot{\vec{j}}_s$ : 电流密度源

## 第二章

$E_s$ : 信号源电动势

## II 微波技术基础

$Z_s$ : 信号源内阻抗

$Z_L$ : 负载阻抗

$f$ : 频率

$\lambda$ : 波长

$\gamma$ : 传播常数

$Z_0$ : 传输线特性阻抗

$Y_0$ : 传输线特性导纳

$\Gamma_L$ : 负载反射系数

$\Gamma_s$ : 波源反射系数

$\Gamma(z)$ : 线上反射系数

$\Gamma_2$ : 终端反射系数

$\rho$ : 驻波比

$K$ : 行波系数

$Z_m(z)$ : 线上任意  $z$  位置处输入阻抗

$\tilde{U}(z)$ : 对入射波归一化电压

$\tilde{I}(z)$ : 对入射波归一化电流

$\bar{Z}$ : 归一化阻抗

$\bar{Y}$ : 归一化导纳

$\bar{R}$ : 归一化电阻

$\bar{X}$ : 归一化电抗

$\bar{l}$ : 电长度或归一化长度

$\bar{G}$ : 归一化电导

$\bar{B}$ : 归一化电纳

### 第三章

$u, v, z$ : 正交坐标系坐标轴变量

$\dot{E}_z$ : 纵向电场复振幅

$\dot{H}_z$ : 纵向磁场复振幅

$\dot{E}_T$ : 横向电场复矢量

$\dot{H}_T$ : 横向磁场复矢量

$\nabla_z$ : 纵向  $\nabla$  算符

$\nabla_T$ : 横向  $\nabla$  算符

$\eta_{TE}$ : 横电波波阻抗

$\eta_{TM}$ : 横磁波波阻抗

$k_c$ : 截止波数、横波波数或临界波数

$G$ : 波型因子或波导因子

$\lambda_c$ : 截止波长

$f_c$ : 截止频率

$TE_{mn}/H_{mn}$ : 矩形波导横电波模式(模式指数为  $m, n$ )

$TM_{mn}/E_{mn}$ : 矩形波导横磁波模式(模式指数为  $m, n$ )

$\lambda_g$ : 波导波长/纵向相波长

$(\lambda_g)_{mn}$ : 矩形波导模序数为  $m, n$  的模式截止波长

$R(\omega)$ : 频域输出函数

$H(\omega)$ : 频域系统函数

$E(\omega)$ : 频域输入函数

$e(t)$ : 时域输入函数

$r(t)$ : 时域输出函数

$h(t)$ : 时域系统函数

$TE_{ni}^{\circ}/H_{ni}^{\circ}$ : 圆波导横电波模式(模式指数为  $n, i$ )

$TM_{ni}^{\circ}/E_{ni}^{\circ}$ : 圆波导横磁波模式(模式指数为  $n, i$ )

$u_n$ :  $n$  阶第一类贝塞尔函数第  $i$  个零点

$v_n$ :  $n$  阶第一类贝塞尔函数导数的第  $i$  个零点

$E_{in}$ : 击穿电场强度

$TE_{ni}^{\circ}/H_{ni}^{\circ}$ : 同轴线横电波模式(模式指数为  $n, i$ )

$TM_{ni}^{\circ}/E_{ni}^{\circ}$ : 同轴线横磁波模式(模式指数为  $n, i$ )

### 第四章

$\dot{U}$ : 等效电压或模式电压

$\dot{I}$ : 等效电流或模式电流

$\dot{e}_T$ : 与  $\dot{E}_T$  对应的矢量模式函数

$\dot{h}_T$ : 与  $\dot{H}_T$  对应的矢量模式函数

$\mu_r$ : 相对磁导率或相对电感率

$\epsilon_r$ : 相对介电常数或相对电容率

$T_i$ :  $i$  端口参考面

$X_N$ : 网络的  $X$  参量矩阵元素

$[X]^T$ : 矩阵  $[X]$  的转置

$[X]^*$ : 矩阵  $[X]$  的共轭

$[X]^+$ : 矩阵  $[X]$  的共轭转置

$[X]^{-1}$ : 矩阵  $[X]$  的逆

$Z$ : 阻抗参量

$Y$ : 导纳参量

$S$ : 散射参量

$T$ : 传输参量

$A$ : 转移参量

$\bar{Z}$ : 归一化阻抗

$\bar{U}$ : 归一化电压

$\bar{I}$ : 归一化电流

$a_i$ :  $i$  端口进波

$b_i$ :  $i$  端口出波

$L_i$ : 吸收衰减



$L_r$ : 反射衰减  
 $L_i$ : 插入衰减  
 $T$ : 电压传输系数  
 $\phi$ : 插入相移  
 $RL$ : 回波损耗

## 第六章

$\Phi(x, y)$ : 二维横向电标量位  
 $\alpha_c$ : 导体损耗引入的衰减常数  
 $\alpha_d$ : 介质损耗引入的衰减常数  
 $(\lambda_0)_{min}$ : 真空中微带传输线的最短工作波长  
 $\epsilon_{re}$ : 微带线的等效相对介电常数  
 $R_s$ : 导体的表面电阻

$v_{ps}$ : 奇模相速度  
 $v_{pe}$ : 偶模相速度  
 $\lambda_{ps}$ : 奇模相波长  
 $\lambda_{pe}$ : 偶模相波长  
 $Z_{0o}$ : 奇模特性阻抗  
 $Z_{0e}$ : 偶模特性阻抗  
 $\beta_o$ : 奇模相位常数  
 $\beta_e$ : 偶模相位常数  
 $C_{0o}$ : 奇模分布电容  
 $C_{0e}$ : 偶模分布电容  
 $\epsilon_{ro}$ : 奇模等效相对介电常数  
 $\epsilon_{re}$ : 偶模等效相对介电常数

# 目 录

绪论 .....	1	1.5 波动方程 .....	27
0.1 什么是微波 .....	1	1.6 场量、本构关系、方程、边界条件的 复数形式 .....	28
0.2 什么是微波技术 .....	2	1.6.1 场量的复数形式 .....	28
0.3 为什么要学习微波技术 .....	4	1.6.2 复数本构关系、复数欧姆定律、 复数电磁参量 .....	30
0.3.1 “长”线 .....	4	1.6.3 场定律的复数形式 .....	31
0.3.2 波“导” .....	5	1.6.4 边界条件的复数形式 .....	31
0.3.3 “魔”T .....	6	1.7 波数和波阻抗 .....	32
0.4 课程定位 .....	8	1.8 均匀平面波 .....	33
0.5 课程内容及安排 .....	10	1.8.1 自由空间中的波 .....	33
0.6 微波的一些特点和应用 .....	11	1.8.2 理想介质中的波 .....	34
0.6.1 定向性强和抗干扰 .....	11	1.8.3 导电媒质中的波 .....	34
0.6.2 电路的分布参数特征 .....	15	1.8.4 良导体中的波 .....	34
0.6.3 穿透性 .....	15	1.8.5 沿任意方向传播的波 .....	35
0.6.4 热效应和生物效应 .....	15	1.9 传播特性 .....	36
0.6.5 似光性 .....	16	1.9.1 相速度和相波长 .....	36
0.6.6 波粒二象性 .....	16	1.9.2 群速度和群延迟 .....	37
0.6.7 微波辐射和散射测量 .....	17	1.9.3 媒质色散 .....	39
第一章 电磁场和电磁波基础 .....	19	1.10 平面波的反射和折射 .....	39
本章导读 .....	19	1.10.1 垂直极化波或横电波 .....	40
引言 .....	19	1.10.2 平行极化波或横磁波 .....	40
1.1 电磁学基本物理量 .....	20	1.10.3 全反射 .....	41
1.2 电磁学场定律 .....	20	1.10.4 全折射 .....	41
1.2.1 自由空间场定律 .....	20	1.11 坡印亭定理 .....	41
1.2.2 物质中场定律 .....	21	1.12 唯一性定理 .....	43
1.3 边界条件 .....	24	本章总结 .....	45
1.3.1 自由空间边界条件 .....	24	习题 .....	46
1.3.2 不同物质交界面边界条件 .....	24	第二章 传输线理论 .....	47
1.3.3 电壁和磁壁 .....	25	本章导读 .....	47
1.4 本构关系和欧姆定律 .....	26	引言 .....	47
1.4.1 自由空间 .....	26	2.1 基本概念和理论 .....	48
1.4.2 简单媒质和理想介质 .....	27		
1.4.3 广义线性媒质 .....	27		

## II 微波技术基础

2.1.1	微波传输线	48	2.11	史密斯圆图	94
2.1.2	长线和短线	49	2.11.1	归一化阻抗和导纳	94
2.1.3	集总参数和分布参数	50	2.11.2	等反射系数圆	97
2.2	传输线方程及通解	51	2.11.3	阻抗圆图	98
2.2.1	长线微元 $dz$ 的集总参数电路模型	52	2.11.4	导纳圆图	102
2.2.2	传输线方程及解	52	2.11.5	阻抗圆图和导纳圆图的转换	102
2.2.3	端口条件	54	2.12	圆图例题	104
2.2.4	解的物理意义	56	2.12.1	已知终端负载阻抗求其他工作 状态参量	104
2.3	传输线一次特征量: 分布参量	58	2.12.2	已知驻波参量求其他工作 状态参量	105
2.3.1	分布电感	58	2.12.3	阻抗和导纳的转换	106
2.3.2	分布电容	59	2.12.4	已知输入阻抗求传输线长和 负载阻抗	107
2.3.3	分布电阻	59	2.12.5	负载和传输线的匹配	108
2.3.4	分布电导	59	2.13	阻抗匹配	109
2.4	传输线二次特征量: 传播特性参量	60	2.13.1	波源匹配和负载匹配	109
2.4.1	传播常数、衰减常数、相位常数	61	2.13.2	$\lambda/4$ 匹配器	112
2.4.2	相速度、相波长	61	2.13.3	单支节匹配器	112
2.4.3	特性阻抗	62	2.13.4	双支节匹配器	114
2.5	工作状态参量	63	2.13.5	三支节匹配器	115
2.5.1	反射系数	63	2.14	有耗传输线	116
2.5.2	输入阻抗和导纳	65	2.14.1	低耗传输线	116
2.5.3	驻波参量	66	2.14.2	传输线色散和无畸变传输线	117
2.6	行波	68	本章总结		118
2.7	驻波	70	习题		120
2.7.1	终端短路	70	第三章 波导理论		125
2.7.2	终端开路	73	本章导读		125
2.7.3	终端接纯电抗性负载	75	引言		125
2.8	行驻波	76	3.1	基本概念和理论	126
2.9	传输功率	79	3.1.1	波导和导行波	126
2.9.1	功率	79	3.1.2	几种常用传输线比较	127
2.9.2	功率容量	81	3.1.3	波动方程和边界条件	128
2.9.3	效率	81	3.2	规则金属波导的一般解法	130
2.10	传输线例题	82	3.2.1	矢量场的纵横分离	130
2.10.1	传播特性参量的计算和转换	82	3.2.2	纵向场法	131
2.10.2	已知终端负载求其他工作 状态参量	84	3.2.3	横电波、横磁波、横电磁波	133
2.10.3	已知驻波参量求其他工作 状态参量	85	3.2.4	纵向场分量方程和边界条件	135
2.10.4	包含信号源的问题	86	3.2.5	导波场解分析	136
2.10.5	多支节串联和并联问题	89			

3.2.6	小结	139	3.12.2	激励和耦合的基本要求和一般原则	194
3.3	矩形波导	140	3.12.3	激励耦合装置和方法	195
3.3.1	TM波	141	本章总结	198	
3.3.2	TE波	144	习题	199	
3.3.3	波导模式和传播特性参量	148	<b>第四章 微波网络</b>	203	
3.3.4	矩形波导传输性质	148	本章导读	203	
3.3.5	例题	150	引言	204	
3.4	矩形波导主模 $TE_{10}$ ( $H_{10}$ ) 模式	152	4.1	微波等效电路关系	204
3.4.1	传播特性参量	152	4.2	均匀波导传输模式等效为双导线	205
3.4.2	场结构	153	4.2.1	等效的目的和原则	205
3.4.3	内壁电流	155	4.2.2	功率关系与等效电压、等效电流	206
3.5	矩形波导高次模式	157	4.2.3	阻抗的不确定性和等效特性阻抗	207
3.5.1	TE波	157	4.2.4	相位常数	211
3.5.2	TM波	161	4.2.5	多模传输线的等效	211
3.5.3	小结	163	4.2.6	等效实例	211
3.6	波导色散和色散波	163	4.3	不均匀区等效为网络	214
3.6.1	波导色散	163	4.3.1	场量等效为电路量	214
3.6.2	色散波和非色散波	164	4.3.2	阻抗参量和导纳参量	216
3.7	波导等效为线性系统	164	4.3.3	网络分类及网络性质	217
3.8	矩形波导功率传输和尺寸选择	166	4.3.4	网络参量的分类	218
3.8.1	传输功率	166	4.3.5	微波网络的特点	219
3.8.2	模式正交性	167	4.3.6	等效实例	219
3.8.3	功率容量	168	4.4	归一化参量	220
3.8.4	衰减和损耗	169	4.4.1	归一化阻抗、归一化等效电压、归一化等效电流	220
3.8.5	波导尺寸选择	171	4.4.2	归一化阻抗参量和导纳参量	222
3.9	圆波导	171	4.4.3	归一化进波和出波	223
3.9.1	TM波	172	4.5	散射参量	223
3.9.2	TE波	175	4.5.1	散射参量和散射矩阵定义	224
3.9.3	主要传输性质	177	4.5.2	散射参量物理意义	224
3.10	圆波导的三种主要模式	180	4.5.3	用散射参量描述网络性质	225
3.10.1	$TE_{01}^{(c)}$ ( $H_{01}^{(c)}$ ) 模式	181	4.5.4	散射参量与阻抗、导纳参量的转换	227
3.10.2	$TE_{01}^{(e)}$ ( $H_{01}^{(e)}$ ) 模式	183	4.5.5	参考面移动对散射参量的影响	228
3.10.3	$TM_{01}^{(e)}$ ( $E_{01}^{(e)}$ ) 模式	185	4.6	二端口网络	230
3.11	同轴线	186	4.6.1	阻抗参量	230
3.11.1	主模	187	4.6.2	导纳参量	231
3.11.2	高次模式	189	4.6.3	散射参量	232
3.11.3	尺寸选择	191			
3.12	波导的激励和耦合	192			
3.12.1	场的对称和反称	192			

## IV 微波技术基础

4.6.4	传输参量	233
4.6.5	网络性质	233
4.7	用散射参量表示常用网络外特性参量	235
4.7.1	电压传输系数	236
4.7.2	插入衰减	236
4.7.3	插入相移	237
4.7.4	输入驻波比	237
4.7.5	回波损耗	237
4.8	二端口网络的组合	238
4.8.1	二端口网络的串联	238
4.8.2	二端口网络的并联	239
4.8.3	二端口网络的级联	239
4.9	转移参量	240
4.9.1	非归一化转移参量	240
4.9.2	归一化转移参量	240
4.9.3	利用转移参量解决级联问题	241
4.9.4	转移参量和其他网络参量的转换	242
4.9.5	用转移参量描述网络性质	243
4.10	基本电路单元	247
4.10.1	串联阻抗	247
4.10.2	并联导纳	249
4.10.3	不同特性阻抗的传输线直接连接	250
4.10.4	理想变压器	251
4.10.5	一段均匀传输线	252
4.11	无耗三端口网络性质	254
4.11.1	性质1	254
4.11.2	性质2	256
4.11.3	性质3	257
4.11.4	性质4	257
4.11.5	性质5	258
4.12	无耗四端口网络性质	259
4.12.1	性质1	259
4.12.2	性质2	261
4.12.3	性质3	262
4.13	微波网络例题	263
4.13.1	利用A参量解决级联问题	263
4.13.2	散射参量的计算与网络性质	265
	本章总结	267
	习题	269

<b>第五章</b>	<b>微波元件</b>	271
	本章导读	271
	引言	271
5.1	一端口元件	271
5.1.1	短路负载	271
5.1.2	匹配负载	273
5.1.3	失配负载	274
5.2	二端口元件	274
5.2.1	连接元件	275
5.2.2	调配元件	275
5.2.3	衰减器和相移元件	278
5.2.4	波型变换器	281
5.3	三端口元件	282
5.3.1	E-T分支	283
5.3.2	H-T分支	284
5.4	四端口元件	285
5.4.1	双T接头	285
5.4.2	魔T	286
5.4.3	定向耦合器	289
5.5	例题	291
	本章总结	293
	习题	294
<b>第六章</b>	<b>微波传输线</b>	296
	本章导读	296
	引言	296
6.1	带状线	297
6.1.1	主模的近似静电场解	297
6.1.2	相位常数和衰减常数	301
6.1.3	特性阻抗	301
6.1.4	高次模式和尺寸选择	303
6.2	微带线	305
6.2.1	主模的近似静电场解	305
6.2.2	相位常数和衰减常数	309
6.2.3	等效介电常数和特性阻抗	310
6.2.4	高次模式	312
6.2.5	尺寸选择	313
6.3	耦合线	314
6.3.1	耦合带状线	315
6.3.2	耦合微带线	315

6.3.3 奇偶模参量分析法 .....	316
6.3.4 相位常数和特性阻抗 .....	317
6.4 微带元件 .....	320
6.4.1 无耗微带 T 型结 .....	320
6.4.2 Wilkinson 功率分配器 .....	321
6.4.3 正交(90°)混合网络 .....	323
6.4.4 180°混合网络 .....	324
6.4.5 微带不连续性及补偿 .....	325
6.5 微带线和其他传输线的转换 .....	325
6.5.1 同轴-微带线过渡结构 .....	326
6.5.2 矩形波导-微带线过渡结构 .....	328
本章总结 .....	329
习题 .....	330

附录 .....	331
附录 A 时域-频域方程转换 .....	331
附录 B dB(分贝)与 N <sub>p</sub> (奈培) .....	332
附录 C 常用数学公式 .....	333
附录 D 普通矩形波导尺寸国家标准 (GB-T 11450.2-1989) .....	335
附录 E 普通圆波导尺寸国家标准 (GB-T 11450.4-1989) .....	337
附录 F 矩阵及其运算 .....	339
附录 G 名词索引 .....	341
附录 H 史密斯圆图使用简要说明 .....	347
主要参考文献 .....	349
部分习题答案 .....	351

# 绪论

---

本课程将学习微波工程基本概念和基础理论。在开始学习本课程之前，初学者通常会关心以下问题：

- 什么是微波？
- 什么是微波技术？其发展历史和趋势是怎样的？
- 为什么要学习微波技术？学习微波技术的必要性和重要性体现在何处？
- 本课程在电子工程和通信等学科的课程体系中定位如何？微波技术与其他课程有什么联系和区别？
- 本课程将具体学习哪些内容？
- 除了课程讲授内容外，微波还有哪些具体特点和应用？

下面就这几方面的问题进行介绍。

---

## 0.1 什么是微波

设单频电磁波频率为  $f$ ，周期为  $T$ ，电磁波在真空中的传播速度等于光速  $c = 3 \times 10^8$  m/s，则对应自由空间中的波长为

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \quad (0-1-1)$$

通常把频率为 300 MHz ~ 3 000 GHz 的电磁波称为微波，根据式(0-1-1)计算，对应的自由空间波长为 1 m ~ 0.1 mm。

微波频率高，波长短，故称微波，微波的“微”是就其波长而言的。另一方面，微波的“微”又是一个相对的概念，主要是指相对自然界的人体、常规电路、一般障碍物的尺寸而言，微波的波长是“微小”的。

微波也是一种电磁波，所以在“电磁场理论”课程中学习过的关于电磁波的知识同样适用于微波。“微波技术”课程将在“电磁场理论”课程基础上继续学习关于电磁波的知识。

图 0-1 为电磁波谱。微波波段又可具体划分为：分米波、厘米波、毫米波、亚毫米波，对应的频率范围和符号如表 0-1 所示。由图 0-1 可以看出，微波频段介于米波（又称超短波或甚高频波）和远红外波之间。

## 2 微波技术基础

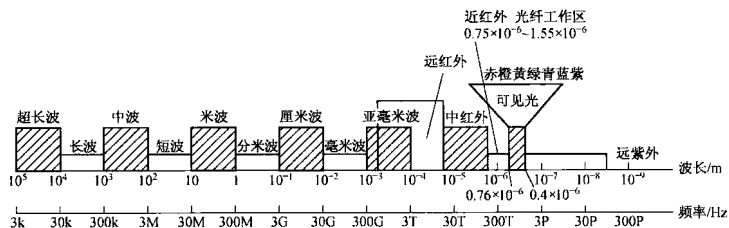


图 0-1 电磁波谱

表 0-1 国际无线电频谱的划分

波段号数	符号(中译名)	频率范围 (下限除外,上限包括在内)	相应米制划分
4	VLF(甚低频)	3 ~ 30 kHz	万米波
5	LF(低频)	30 ~ 300 kHz	千米波(10 000 ~ 1 000 m)
6	MF(中频)	300 ~ 3 000 kHz	百米波(1 000 ~ 100 m)
7	HF(高频)	3 ~ 30 MHz	十米波(100 ~ 10 m)
8	VHF(甚高频)	30 ~ 300 MHz	米波(10 ~ 1 m)
9	微波	UHF(超高频)	300 ~ 3 000 MHz
10		SHF(特高频)	3 ~ 30 GHz
11		EHF(极高频)	30 ~ 300 GHz
12		超级高频	300 ~ 3 000 GHz
			分米波(1 ~ 0.1 m)
			厘米波(0.1 m ~ 1 cm)
			毫米波(1 cm ~ 1 mm)
			亚毫米波(1 ~ 0.1 mm)

## 0.2 什么是微波技术

微波技术的范围很广，其含义可以分为广义和狭义两种。

广义的微波技术可以包括微波的产生、传输、变换(包括放大和调制)、发射、接收、测量等。在绪论的最后一节“微波的一些特点和应用”中概略地介绍了一些实例，实际微波技术包含的内容则更广。

狭义的微波技术主要研究微波的传输方面的问题，包括一些常用的微波传输线和微波无源元件。这些内容一般作为电子信息工程、通信工程、电磁场与无线技术等专业的本科阶段微波技术课所要讲述的内容，是研究其他微波技术问题的基础。

微波技术发展的历史可以追溯到 20 世纪初乃至 19 世纪末。在第二次世界大战中，雷达的研制加速了微波技术的发展，使其成为一门独立的学科。微波技术的发展经历了以下几个重要阶段。



第一阶段：1940 年以前，属于实验室早期研究阶段。

1888 年，德国物理学家赫兹通过实验验证了电磁波的存在，这通常被认为是宏观电磁场理论体系完备建立的标志。另一方面，赫兹在发表的论文中提到他通过特定装置产生并辐射出去的电磁波的波长分布在米波和分米波波段，从而其实验又可以看做是微波技术发展的起点。

其后，虽然有很多物理学家在论文中预言空心金属管可以传输微波，并给出一些波导的初步理论，但直到 19 世纪 30 年代，才通过实验证明空心金属管可以传输微波功率。1936 年 3 月，美国贝尔研究所的研究人员宣布波导传输实验成功，这可以看做是近代微波技术产生的标志。

另外，在此阶段，科学家发明了若干形式的微波电子管，是推动微波技术向前发展的决定性因素。在此阶段还开展了波导、空腔谐振器、微波电子管中电磁场和运动电荷相互作用等方面的理论研究，为微波技术的进一步发展奠定了理论基础。

第二阶段：1940 年至 1945 年，属于微波技术迅速发展并应用于实际的阶段。

此阶段正处于第二次世界大战时期，研究的焦点是将雷达应用于军事。在美国，麻省理工学院 (MIT) 建立了著名的辐射实验室来发展雷达的理论和技術，很多著名的科学家在一起，把微波领域研究推进到一个迅猛发展的时期。

在此阶段产生了很多微波电子器件，微波电路 (包括一系列微波元件)、微波测量技术等方面的研究都得到巨大发展。同时，多腔磁控管、双腔和反射式速调管、特殊结构的微波晶体管等一些新型微波电子管的雏形大量应用于实际。

在此阶段，微波技术发展的特点是理论远远赶不上实际。在战争年代，很多设计问题和实际应用问题不可能等待理论上的严格探讨。

第三阶段：约 1945 年以后，属于微波技术广泛发展和应用的阶段。

此阶段在前阶段的实践基础上，比较完整地建立了一整套微波电子学理论。除继续开辟新波段、扩大应用范围外，还形成了一系列新的边缘科学领域，其中特别需要指出的是：

① 1944 年至今，微波波谱学和量子电子学的大发展。

② 1946 年至 1971 年，射电天文学的大发展。

③ 1947 年至今，微波能利用及微波医学的发展。1947 年，美国雷神公司 (Raytheon Company) 推出第一台商用微波炉。

④ 1964 年成立国际通信卫星组织 (International Telecommunication Satellite Organization, INTELSAT)，微波技术在卫星通信及卫星广播中产生重要应用。到现在，微波技术的应用已遍布各种无线通信系统。

⑤ 1965 年以后，由于微波固体器件、固体集成电路和固体平面电路的出现和发展，微波电路得以向固体化、小型化发展。19 世纪 60 年代末产生第一片单片微波集成电路 (Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)。

目前，微波技术正朝着如下方向迅速发展：

① 向更高频率和更短波长过渡，即向毫米波和亚毫米波发展，以弥补厘米波段和激光波段的空白。

② 向微波电路的小型化、单片集成化方向发展，以及 MMIC 更广泛的应用。

③ 向开辟更多、更新的微波应用领域方向发展。