

微波技术

刘桂珍 主编

内蒙古大学出版社

内蒙古大学教材丛书

微波技术

本书的出版得到内蒙古大学出版基金的资助

刘桂珍	主编
郝文清	编
史云涛	

内蒙古大学出版社

微波技术

刘桂珍 主编

内蒙古大学出版社出版发行

(呼和浩特市大学西路1号)

内蒙古自治区新华书店经销

内蒙古大学印刷厂印刷

开本: 850×1168/32 印张: 11.75 字数: 292千字

1997年5月第1版 1997年5月第1次印刷

印数: 1—600册

ISBN 7-81015-721-3/TN·3

定价: 16.00元

内容简介

本书以场路相结合的方法系统地讲述了微波技术的主要内容,包括传输线基础、微波传输系统、谐振腔、微波电路、微波元器件、微波测量和微波技术的应用。每章都附有一定数量的习题。

本书可作为高等院校无线电及电子类专业、成人高等教育有关专业的教材或参考书,也可供有关工程技术人员阅读参考。

内蒙古大学出版基金委员会

主 任：旭日干

副主任：梁希侠（常务） 呼格吉勒图

委 员：旭日干 梁希侠 呼格吉勒图

曹之江 包 祥 王 璋

刘 成 刘树堂 陈羽云

前 言

《微波技术》是无线电电子学各有关专业的一门重要的技术基础课。它具有以经典电磁场理论为基础的严密的理论体系,具有不同于普通低频无线电技术的传输系统、元器件和测量方法,是进一步学习微波专业课程的必要基础。

本书主要内容包括:绪论、长线理论、微波传输系统、谐振腔、微波电路、微波元器件、微波测量和微波技术的应用。本课程讲授时数约为 70 学时,部分章节可安排学员课外阅读。

这门课程的理论性较强,概念抽象,应用的数学知识较多。因此,学习这门课程之前,应具备复变函数、线性代数、数理方程、电磁场理论或电动力学的扎实基础。要善于从复杂的工程实际问题中进行正确的抽象和简化,学会建立合适的物理模型,采用有效的数学工具,提高分析和解决问题的能力,习题是重要一环,务必予以足够的重视。

本书主要取材于编者多年讲授《微波技术》的手稿、讲义及所积累的资料,同时参考了兄弟院校的同类教材。由刘桂珍担任主编,负责编写绪论、第一章、第二章前半部分、第三章、第五章、第七章和附录,并审阅了全书。郝文清编写第二章后半部分和第六章;史云涛编写了第四章。

本书的出版得到了内蒙古大学出版基金会、电子工程系领导及同行朋友们的大力支持和热情帮助,在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于编者学识水平有限,编写仓促,书中难免有缺点和错误,欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	(1)
第一章 传输线理论	(6)
1.1 引言	(6)
1.2 传输线方程及其解	(7)
1.3 无耗线上的行波与驻波,驻波比与反射系数,驻波相位	(14)
1.4 不同负载时传输线的工作状态	(21)
1.5 圆图及其应用	(31)
1.6 传输线的阻抗匹配	(42)
1.7 有耗传输线、传输功率	(47)
习 题	(53)
第二章 微波传输系统	(56)
2.1 引言	(56)
2.2 导行波系统的场方程	(57)
2.3 矩形波导	(67)
2.4 矩形波导的 H_{10} 波	(78)
2.5 圆波导	(91)
2.6 同轴线	(103)
2.7 微带传输线	(111)
2.8 其它形式的微波传输线	(124)
习 题	(130)
第三章 微波谐振腔	(133)
3.1 谐振腔的构成及特点	(133)
3.2 谐振腔自由振荡的基本原理	(137)
3.3 谐振腔的主要参量	(140)

3.4 矩形谐振腔	(146)
3.5 圆柱形谐振腔	(152)
3.6 同轴线谐振腔	(160)
3.7 其它形式谐振腔简介	(163)
3.8 谐振腔的等效电路及腔的激励与耦合(167)	
习 题	(175)
第四章 微波网络基础	(177)
4.1 概述	(177)
4.2 波导等效为双线	(179)
4.3 微波网络的主要特点	(185)
4.4 微波网络参量	(187)
4.5 网络参量的本征方程、本征值和本征矢	(204)
4.6 基本电路单元的网络参量	(209)
4.7 双端口网络的工作特性参量	(211)
习 题	(216)
第五章 微波元件	(219)
5.1 引言	(219)
5.2 微波基本元件	(220)
5.3 连接与过渡元件	(230)
5.4 衰减器和移相器	(235)
5.5 分支元件	(240)
5.6 定向耦合元件	(249)
5.7 匹配元件	(267)
5.8 波导的激励与耦合	(282)
5.9 微波铁氧体元件	(289)
习 题	(293)
第六章 微波测量	(297)
6.1 微波功率测量	(297)
6.2 驻波系数的测量	(302)
6.3 波长和频率的测量	(310)

6.4 阻抗测量	(314)
习 题	(318)
第七章 微波技术的应用	(319)
7.1 引言	(319)
7.2 微波通信与卫星电视	(320)
7.3 微波加热的原理及其应用	(334)
7.4 雷达、遥感与导航	(343)
7.5 微波检测	(349)
7.6 微波辐射的安全防护	(353)
附录一 矩形与扁矩形波导规格	(357)
附录二 同轴线参数表	(361)
附录三 常用介质基片材料的高频特性	(363)
附录四 微带线常用导体材料的特性	(364)
附录五 几种常用金属的常数	(365)
参考资料	(366)

绪 论

电磁波通常按照频率的高低即波长的短长划分为波段:超长波、长波、中波、短波、超短波、微波、红外线、可见光、紫外线、X射线、 γ 射线等。

微波一般指波长1米到0.1毫米范围内的电磁波,其相应的频率为 $3 \times 10^8 \text{ Hz}$ 到 $3 \times 10^{12} \text{ Hz}$ 。它仍然是电磁波,本质上与频率较低的电磁波没有什么不同。但由于其频率很高,因而有许多特点,所以将它单独划分出来进行研究。

微波通常又划分为四个分波段,如表0.1所示。

表 0.1 微波波段的划分

波段名称	波长范围	频率范围(GHz)	频段名称
分米波	1m~10cm	0.3~3	超高频
厘米波	10cm~1cm	3~30	特高频
毫米波	1cm~1mm	30~300	极高频
亚毫米波	1mm~0.1mm	300~3000	超极高频

国际上又将微波波段划分为更细的分波段,见表0.2所示。

表中S波段代表10厘米波段,C波段代表5厘米波段,X波段代表3厘米波段等。

表 0.2 微波波段划分及其代号

波段代号	频率范围(GHz)	中心波长(cm)
L	1.12~1.7	23
S	2.6~3.95	10
C	3.95~5.85	5.5
X	8.2~12.4	3.2
Ku	12.4~18	2
K	18~26.5	1.25
Q	33~50	0.82

为什么要将微波从整个电磁波谱中专门划分出来加以单独研究呢？主要是因为微波的波长、频率和能量具有特殊量值，这种特殊量值使得微波具有一系列既不同于普通无线电波，又不同于光波的特点。

低频电路只研究物理量随时间的变化，而忽略其空间分布，这是因为一般的电路尺寸比波长小得多，可以认为稳定状态的电压和电流的效应在整个电路系统各处是同时建立起来的，而电压、电流有完全确定的意义，能对系统作完全的描述。然而到了微波波段，微波波长与电路尺寸可相比拟，甚至更小，这时就不能忽略空间电磁场分布。电磁场在其中以波的形式出现，在传播过程中呈现明显的时延效应，同时随着波的传播，电磁能量分布在整个微波电路之中，不再像低频电路那样电场能量仅仅集中在电容中及磁场能量仅仅集中在电感中。由于似稳定条件一旦破坏，建立在电压、电流和克希荷夫定律基础上的集总参数电路分析法不再奏效。为了弄清微波电路中所发生的物理过程，必须直接从研究电磁场入手，即研究电磁场的波动过程。其次，微波段的高频电流集肤效应十分明显，传输线传输微波时的导体损耗和辐射损耗变得相当厉害，以致普通传输线不再适用，而必须采用诸如封闭的金属空管

——波导等微波传输系统来代替,而且各种微波元件也将由它们构成。所以微波电路与低频电路有本质的区别,不仅如此,测量的对象和方法也随之而改变。微波电路可以直接测量的量是功率、波长和驻波参量。电压和电流在微波电路中已失去其原有的物理含义,也不能进行测量。从学科领域看,微波技术已属于应用电磁场工程。

微波的振荡周期已同普通栅控电子管中电子在极间的渡越时间相比拟,因此到了微波段以后,电子的惯性将使栅控电子管失去其有效的控制作用。要克服这一困难只在技术上改进已显得无能为力了,而需要应用新的工作原理,即充分地利用电子渡越时间,使电子在一个足够的空间中和电磁波发生相互作用,于是产生了微波电子学,用微波管、微波固体器件代替普通电子管和晶体管。

微波能量的量子能量大约在 $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{eV}$ ($1.602 \times 10^{-24} \sim 1.602 \times 10^{-21} \text{J}$),它与原子和分子相近能级间之差已可相比,因此厘米波和毫米波可用于分析物质结构,就像在光谱分析中应用光波那样。

微波频段的电磁波具有似光性——直线传播、反射和折射等。微波能很好地穿透高空电离层。

微波电磁波的上述特点构成了其广泛应用的物理基础。

微波技术在通信、雷达、导航、遥感、天文、气象、工业、农业、医疗以及科学研究等方面得到越来越广泛的应用,成了无线电电子学的一个重要分支。微波技术是一门基本技术课。本课程将引导读者从熟悉的电路问题和较为熟悉的电磁场问题转入到较为生疏的电磁波及其工程问题。

为了使读者由浅入深地了解电磁波及其工程问题,我们在第一章中引入单维空间波动概念,即所谓传输线理论或称其为长线理论,从中引出入射、反射、行波、驻波、阻抗匹配等基本概念,然后转入三维空间的电磁波问题。在第二章中,我们应用场解法即根

据边值条件解麦克斯韦方程的方法,研究规则截面的均匀微波传输系统。表征这些系统特性的是电磁场在其中的传输规律,这种规律通过模式理论而表达出来,而且此理论自始至终贯穿于全书。所以,深刻地掌握模式理论,就抓住了微波理论的关键,其它问题也就比较容易解决了。在学习中去努力把握模式理论所反映的深刻的物理规律,在头脑中形成清晰的物理图像。随着频率的增加,传输线横截面尺寸越来越小。本来在厘米波段不成问题的传输系统,到了毫米波段,各种各样的问题都暴露出来。然而毫米波段有其独特性能,它一直为人们所关注。第三章讲述了微波谐振腔,重点分析了矩形腔和圆柱腔电磁场的分布特点及应用,并简要地介绍了腔的等效与耦合。

一个微波系统中,在某一局部范围内往往是一个非常复杂的电磁场的边值问题,一般直接用场解法求解都相当困难。然而许多微波工程问题所感兴趣的并不在于其内部电磁场的解,而是要知道其外部特性,于是可采用微波网络理论。为了建立网络,首先要建立起沟通网络的微波传输系统中各种模式与传输线(或称长线)的等效关系,这就是微波等效电路理论。这种本质上属于场的问题,在一定条件下等效为路的问题。这种化场为路的方法,在微波电路中得到了广泛的应用。本书第四章将介绍此种工程问题的处理方法——等效电路法。

第五章以场路结合的方法研究无源微波元件的基本原理及其应用。第六章研究微波基本量的测量。微波功率、微波频率和波长、驻波参量及阻抗测量的原理和方法。同时简要讲述了主要微波测量仪器的构成和原理。第七章为微波技术应用。以微波通信为主简要介绍了微波在地面通信和卫星通信中的应用,以求达到理论联系实际、学以致用效果。

实际问题是多种多样的,一本教科书不可能全部解决。根本问题不在于记住若干现成的结论,而应在掌握基本原理和方法的

基础上,着重培养分析问题和解决问题的能力。希望在学习时能够独立思考,想得更深些,更广些。不但要知其然,还要知其所以然。不能满足于现象的了解,而要深入思考其物理意义;不能满足于现成的结论,而要研究其解决问题的方法;不能局限于已有的方法,而还要想一想,有没有更好的方法?不能局限于已经遇到的问题,还要设想,如果遇到新的问题该怎么办?总之,要研究方法论问题,具体方法也是不可缺少的。

第一章 传输线基础

1.1 引言

麦克斯韦方程揭示了时变电场、时变磁场相互作用、相互推动在空间产生传播的电磁波的客观规律。电磁能量沿导体或介质边界传播,这些传输能量的系统称为传输线。由传输系统引导向一定方向传输的电磁波称为导行电磁波,简称为导波。

传输系统的任务就是把信号源的电磁能量传向某一系统或负载。常用的传输线如图 1.1 所示。

按其传输的电磁波的场分布状态传输线可分为三大类:

- (1) 横电磁波传输线;
- (2) 横电和横磁波传输线;
- (3) 混合波传输线。

传输横电磁波时,电场和磁场分量分别与传输方向垂直,即 $E_z = 0, H_z = 0$, 如平行双线、同轴线、平板线等。可传输直流到微波频率的电磁波。

传输横电波、横磁波时, $E_z \neq 0$ 或 $H_z \neq 0$, 如矩形波导、圆波导等。

镜象线、介质棒属于混合波传输线, $E_z \neq 0, H_z \neq 0$, 电磁波沿线表面传输,故也称表面波传输线。

本章所讨论的传输线是指工作在高频段的双导体传输系统,例如平行双导线和同轴线等。并以平行双线为例进行分析。

研究传输横电磁波的双导体传输系统的理论,也称作长线理

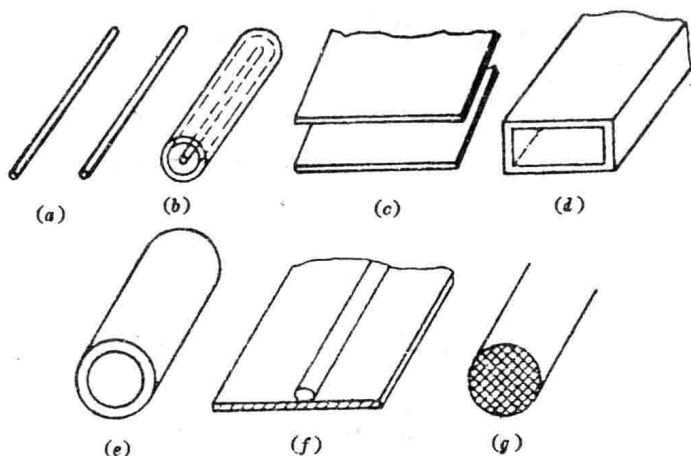


图 1.1 常用的几种传输线

- a) 平行线; b) 同轴线; c) 平板线; d) 矩形波导;
e) 圆波导; f) 镜象线; g) 介质棒

论,然后将所得结论应用到微波传输线。本章所用的理论和方法,很容易推广应用于其它形式波动现象的研究,所以我们说长线理论是解决传输线问题的基础。

1.2 传输线方程及其解

1.2.1 双导体传输线

如果传输线的几何长度 l 比其上传输的电磁波的波长 λ 还长或者两者可以相比拟,则传输线称为长线,反之称为短线。

长线和短线是个相对的概念,是 l 相对于 λ 而言的, l/λ 称为

传输线的电长度或波数。

例：交流市电的频率为 50Hz ， $\lambda = 600\text{km}$ ，几十、几百 km 的电线可视为短线；频率提高到 10GHz 时， $\lambda = 3\text{cm}$ ，一支钢笔长的传输线就是长线了。

短线上各点的 U 、 I 同一时刻、不同位置可看作是一样的；而长线上各点 U 、 I 同一时刻不仅大小可能不等，相位也可能不同。见图 1.2。

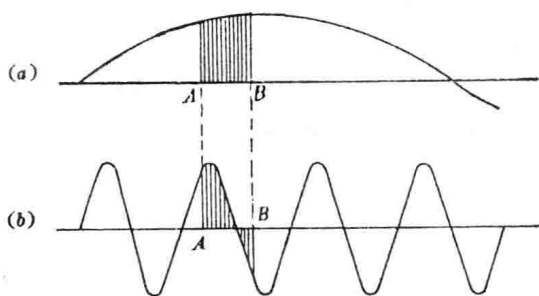


图 1.2 电流或电压沿线分布图

(a) 短线； (b) 长线

对长线，同一时刻线上各点 $U(I)$ 不相同是由于分布参数效应：

当高频电流流过传输线时，导体会发热，这是导线分布电阻效应；当高频电流流过传输线时，导线间绝缘不完善存在漏电流，表明导体间有分布漏电导；当高频电流流过传输线时，导线周围有磁场，表明导体本身有分布电感；当高频电流流过传输线时，导线间有电压，线间有电场，表明导体间有分布电容。当 $\lambda \gg l$ 时，传输线上的这些分布 R 、 G 、 L 、 C 与所联的集中元件相比完全可以忽略，所以低频时不计传输线的分布参数。但当频率提高到 λ 与 l 可以相比时，这些分布参数效应就不能忽略了。所以，高频时传输线本身是一种分布参数电路。