

## 内 容 简 介

本书比较系统和深入地论述了微波技术的基本理论和基本分析方法。主要内容包括电磁场概述、传输线理论、导波与波导、微波网络、无源和有源微波电路、微波天线、微波传播、微波工程子系统等。全书采用场与路相结合的分析方法,以阐明基本概念为主,并给出定量的数学分析和应用举例。各章之间相互呼应,有机结合,自成系统。

该书适于作为高等院校无线电技术专业本科生的教材,也可供从事微波工程技术的科技人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波工程基础 李宗谦,余京兆,高葆新编著.北京:清华大学出版社,1999  
(清华大学信息科学技术学院教材——信息与通信工程系列)

陈丹彤,陈丹彤,陈丹彤

I 援微...摇Ⅱ 援①李... ②余... ③高...摇Ⅲ 援微波技术 原高等学校 原教材摇Ⅳ 援刘...缘

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第 000000号

出 版 者:清华大学出版社

编 者:李宗谦,余京兆,高葆新

社 总 机:(010)62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:(010)62795954

组稿编辑:王仁康,摇邹开颜

文稿编辑:赵从棉

版式设计:刘祎淼

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185mm×260mm 印张:16.5 插页:1 字数:350千字

版 次:1999年 1月第 1版 摇 1999年 1月第 1次印刷

书 号:陈丹彤,陈丹彤,陈丹彤,陈丹彤,陈丹彤

印 数:1-1000

定 价:18.00元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175或(010)62795954

# 《清华大学信息科学技术学院教材》

## 编 委 会

(以姓氏拼音为序)

主 任：郑大钟

副 主 任：蔡鸿程 邓丽曼 胡事民 任 勇 覃 征  
王希勤 王 雄 余志平

编 委：高文焕 华成英 陆文娟 王诗宓 温冬婵  
萧德云 谢世钟 殷人昆 应根裕 郑君里  
郑纬民 周立柱 周润德 朱雪龙

秘 书：王 娜

责任编辑：马瑛珺 王 玲 邹开颜

# 出版说明

摇

摇

摇摇本套教材是针对清华大学信息科学技术学院所属电子工程系、计算机科学与技术系、自动化系、微电子研究所、软件学院的现行本科培养方案和研究生培养计划的课程设置而组织编写的。这些培养方案和培养计划是基于清华大学对研究型大学的定位和对研究型教学的强调,吸纳多年来在教学改革与实践中所取得的成果和形成的共识,历经多届试用和不断修订而形成的。贯穿于其中的“本科教育的通识性、培养模式的宽口径、教学方式的研究型、专业课程的前沿性”的相关思想将成为我们组编本套教材所力求体现的基本指导原则。

本套教材以本科教材为主并适量包括研究生教材。定位上,属于信息学科大类中各个基本方向的基本理论和前沿技术的一套高等院校教材。层次上,覆盖学院公共基础课程、专业技术基础课程、专业课程、研究生课程。领域上,涉及远个系列,源个领域,即学院公共基础课程系列(信息与通信工程系列(含通信、信息处理等领域)、微电子光电子系列(含微电子、光电子等领域)、计算机科学与技术系列(含计算机科学、计算机网络与安全、计算机应用、软件工程、网格计算等领域)、自动化系列(含控制理论与控制工程、模式识别与智能控制、检测与电子技术、系统工程、现代集成制造等领域)、实验实践系列。类型上,以文字教材为主并适量包括多媒体教材,以主教材为主并适量包括习题集、教师手册等辅助教材,以基本理论和工程技术教材为主并适量包括实验和实践课程教材。列入这套教材中的著作,大多是清华大学信息科学技术学院所属系所院开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有多年教学经验和教学改革基础上新编著的教材,也有部分已出版教材的更新和修订版本。教材总体上将突出求新与求实的风格,力求反映所属领域的基本理

论和新进展,力求做到学科先进性和教学适用性的统一。

本套教材的主要读者对象为电子科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与工程、系统科学、电气工程、机械工程、化学与技术工程、核能工程等相关理工专业的大学生和研究生,以及相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望,这套教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者与工程技术人员的知识更新与继续学习提供适合的和有价值的进修或自学读物。我们同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并热忱欢迎提出批评和意见。

《清华大学信息科学技术学院教材》编委会

二〇一〇年 四月

# 前言

摇

摇

## Preface

摇摇无线电波谱是一种资源,微波在其中占有十分重要的地位,其频谱比较宽,可以穿透对流层和电离层,因而许多电子信息系统都采用微波作为载频。微波在国民经济和国防建设中发挥着不可替代的作用。近二三十年来,微波的服务领域不断扩大,新器件、新技术,特别是新系统的不断出现,进一步推动了微波工程技术的发展。微波技术和微波工程是电子信息系统中不可或缺的有机组成部分。许多电子信息系统,如微波通信、卫星通信、移动通信、雷达、微波遥感、全球定位系统( GPS)、遥控遥测系统、电子对抗系统等都离不开微波;光纤通信与微波技术的紧密结合、高速数字系统的设计也需引入微波技术的分析方法,因此电子信息领域的研究人员、工程技术人员具备比较系统的微波技术和微波工程的知识,掌握该领域的基本原理和分析方法是十分必要的。多年来,清华大学电子工程系在制定教学计划时总是将微波工程基础作为电子信息工程专业的必修课,并不断地强调微波工程在大学本科学生知识结构中的重要性。

微波技术和微波工程的内容比较多,通常是将相关的内容写成三或四本书,读者若想了解该领域的全貌势必要读许多书。大学本科教学中的一个重要的宗旨是在保证一定的深度的前提下,尽可能地拓宽学生的知识面。为了这个目标,本书将与微波工程有关的技术领域综合在一本书中,希望能够比较全面地论述微波工程的各个层面,并尽可能地找出微波工程各个技术领域的内在联系,以加强全书的系统性。本书除绪论之外共分九章,分别为电磁场概述、传输线理论、导波与波导、微波网络、无源微波电路、有源微波电路、天线、电波传播、微波工程系统。这九章可分为四部分或四个层次。

第一部分仅含第1章电磁场概述,该章概述了电磁场方程组、本构关系、边界条件以及一系列重要的定理。电磁场理论是微波工程的理论基础,也是全书的基础。学习了微波工程基础之后,许多读者都将进一步体会到电磁场理论的完整严密和应用的广泛性,可以说微波工程是应用电磁场理论的最生动的例子。

传输线理论(第2章)、导波与波导(第3章)和微波网络(第4章)这三章属于第二部分,分别代表了不同于低频集总参数电路的微波电路的三种分析方法,是微波电路的理论基础。传输线理论讲的是分布参数电路的分析方法和工具,不涉及电磁场而仅仅引入电压电流沿传输线波动的概念,与低频集总参数电路的区别是,在电路的分析中考虑了传输线的长度,故历史上传输线理论曾被称为长线理论。导波与波导是用场的方法分析立体的或平面的传输线,导波理论考虑了波导的横向结构,描述了微波传输线上的电磁场的分布和波导的特性。在传输线理论和导波理论的基础上,微波网络用散射矩阵等网络参量描述微波电路的外部特性,并进一步导出直观上不易想像的微波电路的特性。表面上看,传输线理论、导波与波导和微波网络是三种不同的分析方法,但是三者却有着内在的联系,例如:用电磁场理论和导波理论还可导出多导体传输线电报方程;传输线理论是导波理论的简化;微波网络的酉条件、互易性等性质是由传输线理论和电磁场理论导出的;微波网络理论包容了传输线理论,将传输线理论与微波网络结合可给出含信号源和负载的微波电路的形式解。可以说,只有综合或交替使用上述三种方法才能得心应手地分析微波电路,这一点在本书的第三部分将进一步得到印证。随着高速数字信号向高速率窄脉冲发展,其频谱已落入微波波段,传输线的长线效应不可忽视。在第5章的5.1节讨论了高速数字信号在传输线上的传播特性。

无源微波电路(第6章)、有源微波电路(第7章)、天线(第8章)和电波传播(第9章)等四章属于第三部分。无源微波电路和有源微波电路的分析设计是建立在传输线理论、导波理论和微波网络理论的基础之上的。第8章讲述的是电磁波的辐射和接收,第9章讲述的是电磁波在自由空间和近地空间的传播规律。显而易见,天线和电波传播的分析计算离不开电磁场理论,同时也要用到传输线理论、导波理论和微波网络理论,例如,巧妙地应用电磁场的互易定理和散射参量的互易性可以方便地导出发射和接收天线的互易性,这说明天线的互易性和微波网络的互易性本质上是相通的。第三部分内容与电子信息系统密切相关。以通信系统为例,无源和有源微波电路、天线和电波传播完成了通信系统框图的发射、接收和信道功能,在通信系统中是不可缺少的。

第四部分为微波工程系统(第10章),该部分并不全面介绍各种电子信息系统,而仅仅以卫星通信系统为例说明如何将第三部分的内容构成一个具体的通信系统,以便使读者初步建立微波工程系统的概念。

全书从电磁场理论开始,然后讨论微波技术的分析方法、各种具体的传输线、微波部件和电波传播,最后给出微波工程系统的概念,这就是全书的主线。

本书的编写有一个历史过程：1982年为清华大学电子工程系的本科生编写了讲义《微波工程基础》(李宗谦)；1985年由西安交通大学出版社出版了《微波技术》一书(李宗谦、余京兆)，该书获1985年度电子部优秀教材二等奖；1987年由东南大学出版社出版了《微波工程基础》一书(李宗谦、余京兆)，该书获1987年度清华大学优秀教材一等奖。与1987年版相比，这次改版我们作了较大的修订，许多章节或作修改，或增删内容。

本书由三位作者共同完成，其中余京兆编写了第 3 章，高葆新编写了第 4 章，其余各章由李宗谦编写并统编全书。

清华大学电子工程系的各届领导和同事对本书的编写给予了很大的支持和鼓励，在多年的教学实践中，作者与电子工程系学生之间的不断切磋对本书的改写也起到了重要作用，这正是教学相长的具体体现，借此机会向他们表示感谢。在前两个版本和本次版本成书的过程中，清华大学的陆大铨教授、杨弃疾教授、林德云教授、石长生教授、郑君里教授，东南大学出版社的朱经邦老师，国防科技大学的姚德森教授，西安交通大学出版社的杨璐老师，北京理工大学的张德齐教授，浙江大学的黄恭宽教授，西安交通大学的苏毅哲教授，以及许多未曾谋面和署名的老师、同仁作了大量的工作，借此机会向他们表示感谢。

虽然作者作了努力，不足之处仍在所难免，诚恳期盼各位学术先辈、同仁和读者批评指正。

李宗谦

1998年 愿月于清华园

# 目录

## Contents

园瑶绪论 .....	员
园瑶微波的范围 .....	员
园瑶微波的优点 .....	圆
园瑶微波的应用 .....	圆
园瑶本书的结构 .....	源
园瑶对读者的建议 .....	缘
员瑶电磁场概述 .....	苑
员瑶引言 .....	苑
员瑶时变电磁场方程组和媒质的本构关系 .....	苑
员瑶谐变电磁场方程组和媒质的本构关系 .....	怨
员瑶边界条件 .....	员
员瑶坡印亭定理 .....	员
员瑶时变场的坡印亭定理 .....	员
员瑶谐变场的坡印亭定理 .....	员
员瑶惟一性定理 .....	员
员瑶等效源和广义电磁场方程组 .....	员
员瑶对偶性 .....	员
员瑶波动方程 .....	员
员瑶矢量位和标量位 .....	员
员瑶反作用和互易定理 .....	员
员瑶等效原理和镜像定理 .....	员



圆栽源 摇负载端时域信号的形式解应用举例 .....	猿
习题 .....	猿
猿 导波与波导 .....	愿
猿 摇引言 .....	愿
猿 摇规则金属波导的一般理论 .....	愿
猿 摇直接法求解 .....	愿
猿 摇纵向场分量和横向场分量的关系 .....	愿
猿 摇栽云波、栽云波和栽云波的特点 .....	愿
猿 摇导波的坡印亭矢量 .....	愿
猿 摇空心金属波导内不存在栽云波 .....	愿
猿 摇矩形金属波导 .....	愿
猿 摇矩形波导的通解 .....	愿
猿 摇矩形波导中的力线图 .....	怨
猿 摇矩形波导的色散方程与噪空间 .....	怨
猿 摇矩形波导中导波的相速和群速 .....	怨
猿 摇矩形波导中的传输功率与储能 .....	怨
猿 摇矩形波导的衰减 .....	员
猿 摇矩形波导的导体壁电流 .....	员
猿 摇金属圆波导 .....	员
猿 摇圆波导的通解 .....	员
猿 摇圆波导中的力线图 .....	员
猿 摇圆波导的色散方程 .....	员
猿 摇同轴线与平行双线 .....	员
猿 摇同轴线中的栽云波 .....	员
猿 摇同轴线中的栽云波和栽云波 .....	员
猿 摇同轴线栽云波的等效电路 .....	员
猿 摇平行双线 .....	员
猿 摇传输线理论的推广 .....	员
猿 摇栽云波和栽云波的传输线理论 .....	员
猿 摇多导体传输线电报方程 .....	员
猿 摇带线和微带线 .....	员
猿 摇带线 .....	员
猿 摇微带线 .....	员

源源源均匀介质填充的耦合传输线的奇偶模	员缘
源源源耦合带线	员愿
源源源耦合微带线	员怨
源源源介质波导	员猿
源源源相位匹配	员猿
源源源对称薄膜介质波导	员缘
源源源光纤简介	员园
源源源激励耦合	员源
源源源源对场的激励准则	员园
源源源源激励耦合举例	员猿
习题	员远
源源微波网络	员怨
源源源引言	员怨
源源源微波网络的几个定理	员园
源源源微波网络的坡印亭定理	员园
源源源微波网络的互易定理	员员
源源源微波网络的电抗定理	员圆
源源源阻抗矩阵和导纳矩阵	员源
源源源非归一化阻抗矩阵和导纳矩阵	员源
源源源归一化阻抗矩阵和导纳矩阵	员缘
源源源阻抗矩阵和导纳矩阵的性质	员苑
源源源散射矩阵	员怨
源源源散射矩阵和散射参量的意义	员怨
源源源散射矩阵的性质	员怨
源源源参考面移动后的散射矩阵	员员
源源源散射矩阵与阻抗导纳矩阵的关系	员圆
源源源二端口网络	员猿
源源源二端口网络的各种矩阵	员猿
源源源二端口网络的散射矩阵	员苑
源源源二端口等效单元电路	员怨
源源源对称二端口网络的本征值和本征矢	员缘
源源源网络的连接	员愿
源源源网络的串联	员愿

源网络	网络的并联	.....	页
源网络	网络的串并联	.....	页
源网络	网络的并串联	.....	页
源网络	网络的级联	.....	页
源微波信号	通过微波电路的分析方法	.....	页
源微波信号	灶端口网络电路的形式解	.....	页
源微波电路	的等效电源波定理	.....	页
源微波电路	的信流图	.....	页
源微波信号	通过二端口网络	.....	页
习题		.....	页
附录	式( )、式( )和式( )的推导	.....	页
缘无源微波电路		.....	页
缘	引言	.....	页
缘	匹配负载	.....	页
缘	波导接头和同轴接头	.....	页
缘	短路器	.....	页
缘	衰减器	.....	页
缘	吸收式矩形波导衰减器	.....	页
缘	截止式衰减器	.....	页
缘	旋转极化式衰减器	.....	页
缘	模式抑制器	.....	页
缘	波导 栽形分支	.....	页
缘	耘原栽和 匀原栽分支	.....	页
缘	无耗互易三端口网络的性质	.....	页
缘	微带线功分器与合成器	.....	页
缘	魔栽	.....	页
缘	从波导双栽到魔栽	.....	页
缘	魔栽的应用	.....	页
缘	定向耦合器的机理、技术指标和分析方法	.....	页
缘	定向耦合器的简单机理	.....	页
缘	定向耦合器的技术指标	.....	页
缘	对称理想定向耦合器的散射矩阵	.....	页
缘	应用奇偶模理论分析定向耦合器	.....	页

缘园缘微带线定向耦合器 .....	圆怨
缘园缘缘微带耦合线定向耦合器 .....	圆怨
缘园缘缘微带分支线定向耦合器 .....	圆园
缘园缘缘变阻的微带分支线定向耦合器 .....	圆园
缘园缘缘微带环形定向耦合器 .....	圆园
缘园缘圆极化器 .....	圆园
缘园缘旋转对称五端口结 .....	圆园
缘园缘六端口结及其应用 .....	圆园
缘园缘铁氧体器件 .....	圆园
缘园缘缘铁氧体的张量导磁率 .....	圆园
缘园缘缘铁氧体的标量导磁率 .....	圆园
缘园缘缘矩形波导场移式隔离器 .....	圆怨
缘园缘缘矩形波导谐振式隔离器 .....	圆园
缘园缘缘对称再形环行器 .....	圆园
缘园缘谐振腔 .....	圆园
缘园缘缘谐振腔的基本参数 .....	圆园
缘园缘缘矩形腔 .....	圆园
缘园缘缘圆柱腔 .....	圆怨
缘园缘缘同轴腔 .....	圆园
缘园缘缘微带谐振腔 .....	圆园
缘园缘缘介质谐振腔 .....	圆园
缘园缘缘谐振腔的激励耦合 .....	圆园
缘园缘缘腔体微扰与谐振频率的变化 .....	圆园
缘园缘微波滤波器 .....	圆园
缘园缘缘微波滤波器的工作特性 .....	圆园
缘园缘缘低通原型滤波器 .....	圆园
缘园缘缘频率变换 .....	猿园
缘园缘缘电感与电容的微波实现 .....	猿园
缘园缘缘微波低通滤波器 .....	猿园
缘园缘缘倒置变换器 .....	猿园
缘园缘缘变形低通原型 .....	猿园
缘园缘缘微波带通滤波器 .....	猿园
缘园缘缘微波带阻滤波器 .....	猿园
习题 .....	猿园

远瑶有源微波电路 .....	猿远
远瑶引言 .....	猿远
远瑶微波晶体管放大器 .....	猿远
远瑶微波晶体管 .....	猿苑
远瑶微波晶体管放大器的增益 .....	猿苑
远瑶微波晶体管放大器的稳定性 .....	猿愿
远瑶微波晶体管放大器的噪声系数 .....	猿猿
远瑶微波低噪声放大器设计 .....	猿远
远瑶微波功率放大器 .....	猿愿
远瑶微波混频器 .....	猿园
远瑶肖特基势垒二极管 .....	猿园
远瑶非线性电导混频的机理 .....	猿猿
远瑶混频器电路 .....	猿缘
远瑶混频器的噪声系数 .....	猿怨
远瑶接收机噪声系数 .....	猿员
远瑶微波振荡器 .....	猿猿
远瑶微波振荡器的种类与特性 .....	猿猿
远瑶微波晶体管振荡器 .....	猿源
远瑶雪崩二极管振荡器 .....	猿苑
远瑶体效应二极管振荡器 .....	猿员
习题 .....	猿源
苑瑶天线 .....	猿远
苑瑶引言 .....	猿远
苑瑶辐射场 .....	猿苑
苑瑶电流源和磁流源的矢量位 .....	猿苑
苑瑶电偶极子辐射场 .....	猿园
苑瑶天线的基本参数(一) .....	猿园
苑瑶辐射方向图 .....	猿园
苑瑶天线立体角 .....	猿缘
苑瑶方向性 .....	猿远
苑瑶增益 .....	猿苑
苑瑶天线的极化 .....	猿愿

苑源瑶天线的输入阻抗	源园
苑源瑶天线的的基本参数(二)	源员
苑源瑶天线的互易性	源员
苑源瑶极化损失因子	源园
苑源瑶天线有效面积	源源
苑源瑶天线有效面积与天线方向性的关系	源缘
苑源瑶天线的噪声温度	源匠
苑源瑶振子天线	源园
苑源瑶对称振子	源园
苑源瑶折叠振子	源园
苑源瑶对称转换器	源猿
苑源瑶阵列天线	源缘
苑源瑶二元阵	源缘
苑源瑶晕元线阵	源苑
苑源瑶自阻抗与互阻抗	源愿
苑源瑶口面天线	源怨
苑源瑶口面天线辐射场的计算方法	源怨
苑源瑶口面天线辐射场计算举例	源员
苑源瑶抛物面天线	源缘
苑源瑶旋转抛物面天线	源匠
苑源瑶卡塞格伦天线	源愿
习题	源园
愿瑶电波传播	源园
愿瑶引言	源园
愿瑶地球及其近地空间	源园
愿瑶电波传播的各种方式	源源
愿瑶自由空间传输损失	源远
愿瑶对流层对微波传播的影响	源苑
愿瑶对流层的参数和标准大气	源苑
愿瑶对流层对微波的折射	源愿
愿瑶大气对微波的衰减	源员
愿瑶降水的退极化效应	源园

愿爱瑶电波传播的菲涅耳区 .....	源猿
愿爱瑶惠更斯菲涅耳原理 .....	源猿
愿爱瑶自由空间的菲涅耳区 .....	源远
愿爱瑶地面对微波传播的影响 .....	源愿
愿爱瑶视线距离 .....	源愿
愿爱瑶平地面的菲涅耳区 .....	源怨
愿爱瑶地面的反射和散射 .....	源怨
愿爱瑶考虑地面影响的路径损失 .....	源怨
愿愿瑶电离层中的电波传播 .....	源园
怨瑶微波工程系统 .....	源猿
怨瑶引言 .....	源猿
怨瑶卫星通信的微波子系统 .....	源猿
怨瑶卫星通信微波子系统框图 .....	源猿
怨瑶卫星通信线路增益损耗图 .....	源源
怨瑶卫星通信信噪比 .....	源愿
怨瑶卫星天线 .....	源怨
怨瑶地球站天线系统 .....	源园
习题 .....	源员
附录 .....	源圆
附录 I 瑶物理常数 .....	源圆
附录 II 瑶矢量微分算子 .....	源圆
II 瑶直角坐标 .....	源圆
II 瑶圆柱坐标 .....	源猿
II 瑶球坐标 .....	源猿
附录 III 瑶矢量恒等式 .....	源猿
III 瑶加法和乘法 .....	源猿
III 瑶微分 .....	源源
III 瑶积分 .....	源源
附录 IV 瑶常用同轴射频电缆 .....	源缘
附录 V 瑶矩形与扁矩形波导 .....	源缘

附录 VI 半导体材料.....	源远
VI 能带论和晶体.....	源远
VI 费米能级.....	源远
VI 本征半导体和掺杂半导体.....	源远
VI 漂移电流.....	源远
参考文献 .....	源远