



新世纪高等学校教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

DIANCICHANG LILUN YU WEIBO GONGCHENG

(下册)

电磁场理论与微波工程

李大年 主 编

李大年
杨曙辉 编 著



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

新世纪高等学校教材

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

(下册)

电磁场理论与微波工程

DIANCICHANG LILUN YU WEIBO GONGCHENG



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目(CIP) 数据

电磁场理论与微波工程. 下 / 李大年主编. —北京: 北京师范大学出版社, 2010.4
ISBN 978-7-303-10139-9

I. ①电… II. ①李… III. ①电磁场—理论—教材
②微波技术—教材 IV. ①O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 230432 号

营 销 中 心 电 话 010-58802181 58808006
北师大出版社高等教育分社网 <http://gaojiao.bnup.com.cn>
电 子 信 箱 beishida168@126.com

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com.cn
北京新街口外大街 19 号
邮政编码: 100875

印 刷: 北京京师印务有限公司
经 销: 全国新华书店
开 本: 170 mm × 230 mm
印 张: 22.75
字 数: 380 千字
版 次: 2010 年 4 月第 1 版
印 次: 2010 年 4 月第 1 次印刷
定 价: 37.00 元

策划编辑: 梁志国 责任编辑: 梁志国
美术编辑: 褚苑苑 装帧设计: 褚苑苑
责任校对: 李 茵 责任印制: 李 丽

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

北京读者服务部电话: 010-58808104

外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58800825

序 言

电磁场理论、微波工程、天线理论、电波传播、电磁(波)散射、电磁兼容等可以合称为电磁场工程,它是现代科学与技术中一个极重要的领域。它在国防科学、工程技术、科学研究、医疗卫生以及日常生活中具有广泛的应用。而且随着社会的进步,科学技术的发展,其应用范围日益拓展,例如近年来在IT领域中发展起来的蓝牙技术,无线局域网(WLAN)技术,在医疗领域中磁共振技术,CT技术,其他如汽车电子技术,射频识别技术的发展也无一不与电磁场工程有关。

电子工程的理论基础可以分为场与路两方面,即电磁场理论与电路理论。我们知道任何一种电磁现象都不会局限于空间一小部分内(如线路内),所以严格说来研究电磁现象的理论应是场理论,路理论只是在一定近似条件下由场理论派生出的次级理论。当今,电磁波的应用领域中愈来愈向电磁波波谱的高端开拓,电子工程中原来一些只用电路理论就可以来研究的分支学科,如高、低频电子电路,微电子学等也需要用电磁场理论来处理了。

由于电磁理论在电机工程、电子工程、通信及信息工程中的重要性,所以国内外的著名大学无不把电磁场理论列为电机及电子工程系、通信及信息工程系等专业学生的必修课,而且也是电机、电子工程师应具备的基本素养。

本书可作为电子科学与技术、电子信息科学与技术、通信科学与技术有关专业的学生学习电磁场理论与微波技术课程的教科书或教学参考书。

本书内容包括麦克斯韦电磁理论、电磁场问题解法、

电磁辐射与天线基础、电磁场的数值计算方法、传输线与导波理论、微波网络、微波电路及微波系统简介等，基本涵盖了工程电磁场理论及其应用的主要内容。

本书分上、下两册出版。上册电磁场理论由李大年编写，下册微波工程由李大年、杨曙辉合作编写，全书由李大年主编。

作者在编写本书时对自己提出的要求：第一是篇幅要小，讲解要简明，逻辑要清晰，内容要适当的全面。第二是理论紧密联系实际，不是只介绍一些个别的器件原理，而是要与工程系统相结合，使学生们学过本课程后，既见树木又见森林，这对于面向一些宽口径专业的同学求职来说特别重要。第三是尽量不用烦琐的数学推导，以免在教学中引起学生的厌烦，在定理的证明方面不追求数学的严谨，必要时引用一些特例来证明，但是充分解释物理意义。第四是矢量分析不必单独另辟篇章介绍，而是结合高等数学中的曲线积分和曲面积分在适当的物理推导过程中，引入矢量分析和场论中的一些基本概念，矢量分析中的一些恒等式则是在教学需要前，安排学生作为习题证出，这样还可以加深学生们的印象。第五是要适当介绍一些新技术新发展，如电磁场的数值计算方法、智能天线、微波 CAD 软件等。

国内外相当多的学电的学生认为电磁场理论很难学，视为畏途。其实电磁理论本身是逻辑性非常强的，体系是自洽的，物理概念和物理图像也是非常清晰，除了需要一定的数理方程知识外，只要把握住理论体系的逻辑结构是可以学好的，编者就是抱着这一决心来编写本书的，希望与读者共勉。

本书是在编者多年讲授本课程教材的基础上，参考了国内外众多的相关教材增删编纂而成，限于编者的水平，难免有不少缺点和错误，殷切希望广大读者指正。

本书编写过程中陈学东高工，何珺老师帮助作了许多工作，编者在此表示感谢。

本书分上、下两学期讲授，参考学时为每学期 60 学时，如果删节某些章节也可以用 70~80 学时一学期讲完。

目 录

第 1 章 绪 论 /1

- § 1 通信的需求与电磁波波谱的开拓 1
- § 2 微波的特点 3
- § 3 微波技术的发展历史 4
- § 4 微波的应用 5
- § 5 本教材的内容编排 7

第 2 章 传输线的基本理论 /8

- § 1 麦克斯韦方程的横电磁波(TEM 波)形式 8
- § 2 传输线方程 11
- § 3 均匀传输线的稳定正弦状态 15
- § 4 入射波 反射波 反射系数 19
- § 5 传输线方程的双曲线函数形式及传输线的等值网络 22
- § 6 输入阻抗 开路线 短路线驻波比 26
- § 7 传输线圆图 反射系数圆图阻抗圆图及导纳圆图 34
- § 8 Smith 圆图及其应用 37

§ 9	传输线的阻抗匹配	43
§ 10	对称微带线	54
§ 11	微带线	57
§ 12	耦合带状线	66
§ 13	高速计算机及数字系统中的传输线	75
§ 14	Smith 圆图的软件设计	79

第 3 章 微波网络基础 /90

§ 1	引言	90
§ 2	均匀波导管的等效电路	91
§ 3	单端口网络(二端网络)	97
§ 4	微波网络的广义基尔霍夫定律	100
§ 5	散射矩阵	102
§ 6	双端口网络	107
§ 7	双口网络散射参数的实验测定 双口网络的外特性 参数	110
§ 8	微波网络的信号流图	112
§ 9	微波电路中的不均匀区和不连续区	115
§ 10	微波电路计算机辅助分析	118

第 4 章 微波滤波器与阻抗变换器 /128

§ 1	概述	128
§ 2	滤波器的插入衰减综合法	131
§ 3	低通原型滤波器的梯形网络综合法	138
§ 4	微波低通滤波器设计法	144
§ 5	微波高通与带通滤波器	151
§ 6	倒置变换器与变形原型滤波器	154
§ 7	平行耦合线带通滤波器	160
§ 8	$\lambda/4$ 阶梯阻抗变换器的综合设计	166

第 5 章 微波多端网络与器件 /173

§ 1 三端口网络 环行器	173
§ 2 E-T 接头及 H-T 接头	177
§ 3 四端口网络 魔 T	181
§ 4 混合环	184
§ 5 定向耦合器	189
§ 6 波导小孔定向耦合器	192
§ 7 平行耦合传输线定向耦合器	194
§ 8 微波功率分配器与功率合成器	197
§ 9 微波铁氧体	200
§ 10 微波铁氧体器件	206

第 6 章 微波电真空器件 /211

§ 1 引言	211
§ 2 双腔速调管	212
§ 3 多腔速调管	221
§ 4 反射速调管	224
§ 5 行波管	233
§ 6 慢波结构	235
§ 7 磁控管	239

第 7 章 微波半导体器件与电路 /245

§ 1 引言	245
§ 2 肖特基表面势垒二极管	246
§ 3 微波混频器	249
§ 4 转移电子振荡器与放大器	255
§ 5 变容二极管参量放大器与变容二极管上变频器	262
§ 6 微波晶体管放大器	270
§ 7 微波晶体管振荡器	283
§ 8 PIN 二极管及其应用	289
§ 9 微波单片集成电路	291

第 8 章 微波工程系统 /295

§ 1 引言	295
§ 2 微波接力通信及卫星通信	295
§ 3 雷达	299
§ 4 遥感系统	302
§ 5 GPS 全球定位系统	304

附录 1 Matlab 编程实现 Smith 圆图计算的程序 /308

附录 2 射频及微波工程 EDA /323

附录 3 微波电路计算机辅助分析的程序 /337

参考文献 /354

第1章 绪论

§1 通信的需求与电磁波波谱的开拓

所谓通信，广义地说就是两个不同的单元彼此之间传递信息。这两个单元可以是人与人，也可以是人与机器，或者机器与机器，或者是机器的这一部分与另一部分，甚至可能是细胞与细胞。由此可见，通信是在自然界以及人类社会中普遍存在并且起着重大作用的一种客观现实。

当前，我们所谈的通信主要是指电信，就是利用电信号传送信息。电信的出现至今也不过只有一百多年的历史，但是对于人类社会的发展却有着巨大的作用。人类社会愈是现代化，对于通信的需求就愈是巨大。当前人类社会正向信息化社会发展，信息传递的速度与质量是社会发展的必要条件。

现在我们来简单回顾一下电信系统及其发展过程，由此我们将得出一些重要结论。最简单的电信就是直流电报，它是以一定的持续时间 τ 交替按键和放键而形成的脉冲信号，采用导线传输，其波形如图 1-1 所示。这一脉冲信号可以用傅里叶级数展开为：

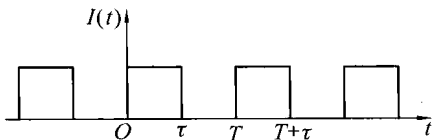


图 1-1

$$I(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \pi n f t + B_n \cos \pi n f t$$

式中：

$$f = \frac{1}{T}$$

f 为基波频率， T 为周期，事实上，上式中的谐波数目 n 不必取无穷多，例如 5 次即已足够。可以证明，这时的传输带宽只需 20 Hz 即已足够。但在实际上为了通信可靠，通常的直流电报传输带宽 Δf 定为 0~100 Hz。

传真电报已不是传输文字的编码，而是直接传输真迹文字或图像。由直观即可看出它所传输的信息量比电报大的多，它所需要的带宽 Δf 约为 3000 Hz。

按照信息论，通信系统所传输的信息量与系统的通频带成正比。常见的一些通信系统及其所需的带宽如下：

电话: $\Delta f = 150 \sim 3400 \text{ Hz}$

广播: $\Delta f = 8 \sim 10 \text{ kHz}$

高质量调幅广播: $\Delta f = 15 \text{ kHz}$

调频广播: $\Delta f = 150 \text{ kHz}$

电视广播: $\Delta f = 12 \text{ MHz}$, 单边带发送时则只需 $4 \sim 6 \text{ MHz}$

由此可见, 通信系统的发展要求占用的频带越来越宽(这也体现了人们日益增长的通信需求), 因而要求人们不断地开拓电磁波频谱来满足这日益增长的需求. 以无线电广播为例, 它一般占用电磁波频谱的中波和短波, 波长约在 1000 m 至 10 m , 频率由 3000 kHz 至 30 MHz , 如以每个电台每套节目的频宽为 10 kHz 计算, 这一频段大约只能安排 3000 个电台, 其中又包括了世界上所有的通信台、广播台、导航台甚至遥测、遥控台. 这显然是不够用的.

问题还不止于此, 我们还有调频广播(频宽 15 kHz)和电视广播(频宽 $4 \sim 6 \text{ MHz}$), 此外还有业余无线电通信, 这些都无法安排在这一频段, 所以我们只能把它们安排在超短波波段. 此外还有微波通信和卫星通信, 由于都是大容量通信, 传输几千到几万路电话, 所用的传输带宽都在上千兆赫, 因而有些卫星通信所用的射频已延伸到毫米波.

关于电磁波波谱及其利用情况参见表 1-1, 由以上所述可知, 只有日益开拓所能掌握的更短波长的新频带, 才能满足通信的需求以及通信系统发展的需要.

表 1-1

对应波长及频率	频宽 Δf	频段利用	频段及波段名称
$\lambda: 1000 \sim 100 \text{ m}$ $f: 300 \sim 3000 \text{ kHz}$	$\Delta f = 2700 \text{ kHz}$	调幅广播台 270 个	中频(MF), 中波(MW)
$\lambda: 100 \sim 10 \text{ m}$ $f: 3 \sim 30 \text{ MHz}$	$\Delta f = 27 \text{ MHz}$	调幅广播台 2700 个	高频(HF), 短波(SW)
$\lambda: 10 \sim 1 \text{ m}$ $f: 30 \sim 300 \text{ MHz}$	$\Delta f = 270 \text{ MHz}$	可安排 60 个电视台, 或一部分调频广播台	甚高频(VHF), 超短波
$\lambda: 1 \text{ m} \sim 30 \text{ cm}$ $f: 300 \sim 1000 \text{ MHz}$ (1 GHz)	$\Delta f = 700 \text{ MHz}$	500MHz 以下为电视广播 500MHz 以上为卫星电视广播	特高频(UHF), 分米波

续表

对应波长及频率	频宽 Δf	频段利用	频段及波段名称
λ : 30 cm~1 mm f : 1~300 GHz	$\Delta f = 299$ GHz 为所有长, 中, 短波 的 299 倍	微波通信, 电视节目传输, 卫星通信, 雷达, 遥测, 遥感	超高频 (SHF), 微波 (厘米波, 毫米波)
λ : 1~0.1 mm f : 300~3000 GHz	$\Delta f = 2.7 \times 10^6$ MHz 为短波的 10 万倍		亚毫米波 (Sub-millimeter wave)
λ : 0.1 mm~10 μm , 10~1 μm	$\Delta f = 7.5 \times 10^{10}$ MHz 为短波的 28 亿倍	可以把全世界的所有电话路数包括在一束细光束中, 用于光通信	远红外 (far-infrared), 红外线 (infrared)
λ : 0.76~0.4 μm		光通信, 水下通信	可见光
λ : 0.1~0.01 μm			紫外线
λ : 10~0.1 $\text{\AA}$, 1 $\text{\AA} = 10^{-10}$ μm			X 射线
λ : 0.01 $\text{\AA}$ ~			γ 射线

§ 2 微波的特点

(1) 微波的波长很短, 典型的数值约为厘米级, 与地球上的一般物体如房屋, 轮船, 飞机等尺寸 (约几十米) 相比小得多, 相比之下可以认为是无穷小. 此时, 微波的行为可以近似地用几何光学理论来描述, 因而呈现似光特性, 当其照射到物体上时会产生显著的反射. 这正是微波雷达的应用基础. 此外, 由于天线的方向性增益和天线尺寸与波长比的平方成正比, 因此, 在微波波段使用尺寸不大的天线就可提供很高的增益和极强的方向性.

(2) 微波的频率很高, 每秒振动 10 亿次以上. 因此在不太大的相对频宽下, 其可用频带极宽, 可达数百或上千兆赫. 因而其信息容量很大. 在通信应用方面有着巨大的潜力.

(3) 频率极高, 周期很短, 因而电子在电子器件中的渡越时间已不能忽略. 这意味着必须用与低频电子器件不同的崭新的物理原理, 来研制新的微波电子器件.

(4) 微波在传播特性方面也具有一系列的新特点, 由于它的似光性, 表现出直射传播特性, 且在大气中传播稳定, 这一特点适于发展地面微波接力通

信。由于它可以穿透电离层，因而它是无线电波谱中的又一个“窗口”，这导致了射电天文学和卫星通信的发展。

(5) 由于微波的波长已可与通常的电路元件(R 、 L 、 C)的尺寸相比拟，因而在这些元件中及元件附近，场的分布已变化很大，这时元件的特性已不能再用一个参数来表示，而必须考虑到分布效应，电路参数需由集总参数过渡到分布参数。

(6) 在理论与研究方法上与低频电路也不同，主要应用场理论，而不是路理论。例如：波导与电磁谐振腔理论就是典型的场理论。在研究方法上也愈来愈多地与光学技术相结合，例如应用几何光学理论研究反射面天线，透镜天线，用迈克尔逊干涉仪作为谐振腔等。

(7) 开始考虑量子特性。根据量子理论，电磁波具有波-粒二象性，频率为 f 的电磁波是由能量 $E = hf$ 的光子组成，式中 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ，为普朗克常数。当频率极高时每个量子的能量已不再能视为无穷小，因而在一束功率较低的电磁波中，粒子特性开始表现出来，这时研究它们就必须应用量子规律。这方面的例子就是微波量子放大器。

§ 3 微波技术的发展历史

微波技术的发展大致可分为如下几个阶段：

1930 年至第二次世界大战前为理论研究及实验室阶段。这时人们已经研究了电磁波沿中空波导管的传播、电磁谐振腔理论，多种微波电真空器件的原理已经提出，并且已经达到了实验室水平。

第二次世界大战期间，由于战争的需要，微波技术已广泛应用于雷达、导航、遥感遥控等领域，这是微波技术发展的黄金时期，为今后微波技术的发展奠定了基础。这在 MIT 辐射实验室的 28 本关于雷达和微波技术的专著中得到了体现。

战后，微波技术已由军事应用转移到科学研究及民用方面的应用，在雷达技术的基础上微波接力通信开始发展起来，此时还先后创立了微波波谱学、射电天文学、雷达气象学等学科。

20 世纪 60 年代出现了像带状线、微带线等新型的微波传输线，使得微波器件开始向集成化、固态化发展，微波集成电路、微波固态器件已达到了实用化阶段。多种新型的器件，如参量放大器、微波量子放大器(maser)等也达到了实用阶段。

当前，微波技术的应用日益广泛，卫星通信、移动通信、无线局域网、

GPS定位系统的应用已到了普及阶段。微波固态器件开始向高功率发展,已逐步取代电真空器件。微波集成电路的集成化程度更高,具有大规模集成电路水平的微波单片集成电路已有实用性产品。计算机被广泛用于微波电磁场的分析与设计,自动测试系统和智能化微波仪器也普遍地发展起来了,一些新型的微波毫米波源,例如回旋管、自由电子激光器等已经达到了很高的水平。毫米波技术在航天、制导、卫星通信、遥感等方面已达实用化,亚毫米波的频谱开拓和应用研究正在蓬勃发展。

§ 4 微波的应用

1. 雷达

雷达是微波技术的主要应用之一,正是第二次世界大战对雷达日益改进的要求,使得雷达和微波这两门技术相辅相成地发展起来了。雷达是利用目标对电磁波的反射来探测目标的方位、距离和速度,并进而用来跟踪、导航、控制人造卫星和飞行器的飞行。雷达还可用来探测风速、风向,测定雨、雪分布,云层的高度及厚度,这些研究内容即构成了所谓雷达气象学。

雷达技术军事应用的更进一步发展就是电子对抗技术,又称电子战。它最初是设法干扰敌方的雷达回波,进而要求测定敌方雷达的位置、工作频率以及其他工作参数等以提供重要的军事情报,这就是电子侦察。当然,敌方也希望日益改进其技术以进行对抗。这方面的代表作就是目前国际上大力进行研究的无雷达回波的所谓隐形飞机。电子对抗所应用的技术主要的也是微波技术。

2. 通信

微波应用于通信除了因为它的可用频带宽之外;由于它的天线方向性强、波束窄,所以它还具有抗干扰能力强、保密性高等特点。它可应用于点对点通信、微波多路接力通信、卫星通信、移动通信、散射通信、市内直拨电话通信、公路通信、油管通信以及海上钻井平台与陆地基地的通信等,其中尤以移动通信的迅猛发展和普及,为微波技术应用提供了前所未有的广阔前景。

3. 科学研究应用

微波在科学研究方面的应用范围也是十分广泛的。例如作为时间和频率基准的铯原子钟,实际上就是一个微波量子振荡器,它是用铯-133的微波辐射谱线作为频率和时间基准的。高能物理中用来加速基本粒子的直线加速器、同

步回旋加速器也是采用微波电子管，并在微波技术的基础上发展起来的。此外，还可以用微波测量电介质的性质、测量等离子体性质及加热等离子体。微波遥感是遥感技术中的一个重要分支，它可以用来测量农作物和土壤中的水分、湿度。在地质学中它可以用来找水、探矿，尤其是用来找石油。射电天文学也是微波技术在科学研究方面的主要应用，20 世纪 60 年代天文学的四大发现——类星体、中子星、2.7K 背景辐射和星际有机分子全是利用微波作为主要观测手段而发现的。

4. 微波的工业应用

这方面的应用也是很广泛的，在食品工业中用来干燥、烘烤、消毒、快速加热冰冻食品，在橡胶工业中用来加热、硫化、制造多孔橡胶，在木材工业、皮革工业、油漆工业、纺织工业以及印刷工业中用来干燥，还可以用来熔炼高质量的光学玻璃等。

微波还可以用来测量长度、速度、厚度。如在冶金工业中用来测量钢板和线材的厚度和尺寸，也可测量绝缘板或纸张的厚度。

此外，微波还可以用来测量和连续监视多种物体中的水分含量和湿度。在安全与保卫系统中还可利用微波来监测和监视。

5. 微波的其他应用

在农业上可用来灭虫杀菌，用来育种、育蚕、谷物干燥以及谷物含水度的测量等；在医疗方面可用作微波理疗、治疗癌症（尤其是皮肤癌）、监听心脏跳动、肺的水分检测，此外研究人体内的电磁传输还可以用作多种的非侵入性的诊断检查。作为冰冻组织的快速融化，将来还可能用于开胸外科手术之中。

在日常生活当中，广泛应用微波炉，微波烘箱来烘烤食物，并可用于冷冻食品、血液的快速融化。

6. 微波的潜在应用

微波潜在应用的最诱人前景是太阳能卫星功率站，即在地球的同步轨道上安置卫星功率站，把太阳能变成直流电能，然后再换成微波能，由发射天线射向地球，在地球上安置接收天线接收微波辐射，然后再转换成直流电能以供应用。表 1-2 列举了一个提议中的 10000 MW 卫星功率站的技术经济指标。

表 1-2

空间站	空间站尺寸	10 km×20 km
	净重	86×16 ⁴ kg
	寿命	30 年

续表

发射天线	频率	2450 MHz
	微波发生器的数目	10^6
	尺寸	1 km
	90%功率主瓣波束宽	2.15×10^{-4} rad
主瓣地面微波功率密度	轴上的功率密度	29.3 mW/cm^2
	90%功率的功率密度	2.7 mW/cm^2
	90%功率的半径	3.85 km
第一个旁瓣地面微波功率密度	最大功率密度	0.2 mW/cm^2
	半径	6.9 km
接收天线特性	面积	$9.7 \text{ km} \times 12.6 \text{ km}$
	半波振子, 间隔 $0.6\lambda \times 0.6\lambda$	10^{10}
	每个元件检拾的功率	$\sim 1 \text{ nW}$
价格	研制费用	440 亿美元
	安装费用	76 亿美元 (5000 MW)
	运转费用/年	140 百万美元
	30 年周期的预期收益	350 亿美元

§ 5 本教材的内容编排

本书为电磁场理论与微波工程一书的下册, 即微波工程。全书共分 8 章。第 1 章绪论简述微波的特性、应用及发展简史。第 2 章传输线的基本理论为本书的重点, 为了与上册电磁场理论及导波理论相承接, 分别由麦克斯韦方程和分布参数电路理论出发推导出了传输线方程, 详细讨论了入射波、反射波、反射系数、阻抗匹配、史密斯圆图等分布参数电路的主要概念。第 3 章讲述微波网络基础, 从最简单的 TE_{10} 模波导传输为例, 导出了波导管的等效(模式)电压, 等效(模式)电流及等效电路, 从而把 TEM 波与非 TEM 波传输线都可化作微波电路(网络)来研究。从电磁场的唯一性定理出发导出了微波网络的广义基尔霍夫定律, 散射矩阵以及其他电路参数矩阵描述。第 4 章、第 5 章介绍了滤波器、阻抗变换器、环行器、功分器、定向耦合器等无源微波器件的原理、结构、应用及设计方法。第 6 章、第 7 章分别介绍了微波电子管及微波半导体器件等微波有源电路; 介绍了混频器、放大器、振荡器电路结构及设计计算。第 8 章以应用广泛的微波接力通信、卫星通信、雷达、遥感为例, 比较详细地介绍了微波工程系统, 使得学生们对微波工程有一整体的了解, 用以概括全书。附录中介绍了当前发展迅速的协同设计 EDA 方法。

第 2 章 传输线的基本理论

§ 1 麦克斯韦方程的横电磁波(TEM 波)形式

本章我们来讨论微波理论中一个重要的而且也是基本的部分——传输线理论。我们将从电磁现象的普遍规律——麦克斯韦方程组出发来建立起我们的理论体系；我们将由场方程导出电路的物理量，如：电压、电流，以及电路参数 R, L, C, G 等概念，并推导出传输线方程式，这样做不仅只是为了理论的严格性，更重要的是为了说明在微波波段，低频电路理论已不适用，需要加以彻底改造。因此，整套理论要从头建起。这样做也可以和微波理论中另一个主要部分——波导理论的体系相一致。传输线理论也可以由电路的观点加以发展，这一点留待稍后来做，而且我们还要把由电路观点发展起的理论和由电磁场观点发展起的理论相对比。

为此，我们考虑电磁波沿柱状导体系统(导体系统的横截面形状不随 z 轴而变)的传播，设导体系统在横截面上的轮廓形状为 (C_1) 和 (C_2) ，参见图 2-1。此外还设媒质是均匀的，因而导磁系数 μ 、介电常数 ϵ 、电导率 σ 均为常数。采用直角坐标系时，电场和磁场可写成：

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= e_x E_x + e_y E_y + e_z E_z = \mathbf{E}_T + e_z E_z \\ \mathbf{H} &= e_x H_x + e_y H_y + e_z H_z = \mathbf{H}_T + e_z H_z \end{aligned}$$

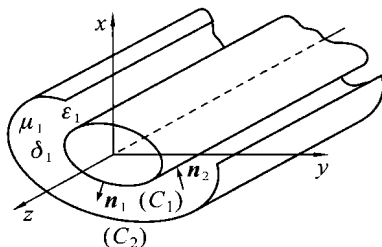


图 2-1 传输电磁波的柱状导体剖面示意图

如果假设场没有 z 轴分量，则

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= e_x E_x + e_y E_y = \mathbf{E}_T \\ \mathbf{H} &= e_x H_x + e_y H_y = \mathbf{H}_T \end{aligned} \quad (2-1)$$

式中，下标 T 表示场是位于横截面(即 xy 平面)内的，这种形式的波其场分量全部位于横截面内故称为横电磁波(TEM 波)。对于 TEM 波，我们写出麦克