

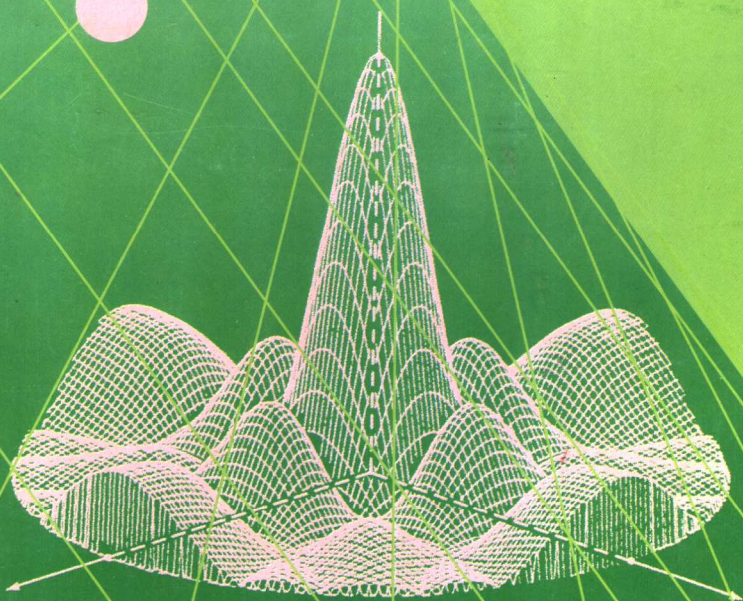
电磁场与微波技术

(下 册)

(第二版)

李绪益 编

华南理工大学出版社



电磁场与微波技术

(下册)

第二版

李绪益 编

华南理工大学出版社

·广州·

内 容 简 介

本书是在第一版的基础上修订而成,内容包括:电磁场与电磁波,微波技术,天线及电波传播三大部分。全书共 18 章,分上、下册出版。上册内容有:矢量分析,静电场,恒定电场,恒定磁场,静态场的边值问题,时变电磁场,平面电磁波。下册内容有:传输线理论,微波传输线,微波谐振腔,微波网络基础,微波元件,微带传输线,微波振荡器,微波测量,微波加热及微波辐射的安全防护,天线及无线电波传播。每章都附有一定数量的习题及其答案,便于自学。

本书可作为电子工程、通信工程、信息工程、电子应用技术等电子类专业,以及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。

图书在版编目(CIP)数据

电磁场与微波技术(下册)/李绪益编.—2 版.—广州:华南理工大学出版社,2000.2
ISBN 7-5623-0256-1

I . 电…

II . 李…

III . 电磁场-微波技术

IV . O441.4 TN015

华南理工大学出版社出版发行

(广州五山 邮编 510640)

责任编辑 张颖 傅穗文

各地新华书店经销

广州市新光明印刷厂印装

*

2000 年 2 月第 2 版 2000 年 2 月第 6 次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:25.375 插页:1 字数:628 千

印数:18 001—23 000 册

定价:39.00 元

前 言

电磁场理论是一门研究各类电磁现象内在规律的基本理论。

表现为电磁形式的能量和信息,具有便于产生、传送、量测、贮存、加工处理、控制及转化为其它能量和信息的特点,因此得到了广泛的应用。例如无线电类专业的通信、广播、电视、雷达、遥感遥测等都离不开电磁波的产生、发射、传播和接收;元器件类专业的电子器件,则要求遵循电子在运动状态下的规律;电力类专业的电机、电器制造、高压工程等,则要运用电磁能量的转换、传输与控制。所有这些应用领域,无不以电磁场理论为基础,尤其在信息方面,如全息图像、遥感技术、光纤通信、卫星通信等,其应用更加广泛和深入。因此,在我国各高等院校及世界先进工业国的工科大学中,一般都把它作为电类专业的必修课。

电磁场理论是电类专业的共同基础和共同的生长点。不仅如此,它过去、现在和将来都是边缘学科、交叉学科的孕育点。

这门课程的理论性较强,概念较抽象,应用的数学知识较多,因此,学习这门课程之前,应当具备大学物理和高等数学的扎实基础。

本书分上下两册。上册研究电磁场与电磁波,共7章,内容包括矢量分析、静电场、恒定电场、恒定磁场、静态场的解、交变电磁场、平面电磁波。下册研究微波技术,共8章,内容包括长线理论、微波传输线、微波谐振腔、微波网络、微波元件、微波振荡源、微波测量、微波的应用。上下册的内容既前后衔接,又相对独立,可合并使用,也可单独使用。

由于篇幅及教学时数的限制,本书力求内容精选、重点突出,以加强基础理论,并反映最新理论和技术;在内容的安排及叙述上,力求由浅入深,循序渐进,通俗易懂;在概念与数学分析的关系上,既强调物理概念,也不回避必要的数学推理,使读者既能掌握正确的物理内涵,又能得到必要的数学逻辑思维 and 数学运算能力的培养。每章都选编了一定数量的习题并给出答案,以便于自学。

本书主要作为高等院校无线电与电子类专业的教材。若在内容上作适当的取舍也可作为不同层次、不同类型的电类专业的教材或参考书。

本书由李绪益担任主编。罗惠萍编写了上册的第1至第3章,马冰然编写了上册的第4至第7章,林志编写了下册的第3至第7章,李绪益编写了下册的第1、2、8章及上、下册的附录。本书的出版,得到了华南理工大学教务处、无线电工程系的领导,以及微波与天线教研室、物理电子教研室的同志们的大力支持和热情帮助,梁金义编写的讲义也给予有益的借鉴,在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,欢迎读者批评指正。

编 者
1991年1月

再 版 前 言

本书作为高等工科院校电子类专业(非电磁场与微波专业)的教材,于1991年出版以来,被全国许多高校采纳与应用(重印5次)。这次再版是针对多年来在使用本教材的过程中所发现的问题,结合编者长期从事这门课程教学实践的体会与心得,经过认真的总结,在第一版的基础上作进一步的充实与提高而成的。修订版力求在保证“三基”的前提下,更多地反映微波技术的新发展及实用的分析、设计方法,以尽可能贴近工程应用的实际需要。本次修订除了将一些错漏的地方修正以外,主要有:

第一,将微带线及微带元件的有关内容归并,独立成一章,并适当增加其所占分量,以适应微波技术向小型化、集成化发展的需要。这一章给出的有关公式、图表基本上可以满足工程设计应用的需要。

第二,将本书的第3~5章在第一版的基础上进行了重新编写,以期前后更加连贯,风格更为一致,重点更为突出。

第三,原微波技术应用一章,部分内容纳入绪论,部分内容编入第9章,将其余内容进行删节以节省篇幅。虽然第9章的内容可以不讲授,但对于从事微波技术的实际工作者来说,微波辐射的安全防护知识是不可缺少的,所以以显著位置保存这部分内容。

第四,考虑到许多院校非微波天线专业将天线及电波传播的内容纳入微波技术课程的情况,为了教学取材的方便,而增加了天线及无线电波传播两章。天线一章是在我校历年采用的教材《天线》的基础上修订而成。

经修订后,本书的内容无疑更为充实丰富,其系统性、完整性及可读性均有所提高,各校可根据不同的情况及要求,对讲授的内容进行选择取舍。为便于自学,每章均附有一定数量的习题,大部分给出答案。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,殷切希望读者批评指正。

编 者
1999年9月

目 录

0 绪论	(1)	2 微波传输线	(40)
0.1 什么是微波	(1)	2.1 导行波系统的场方程	(40)
0.2 微波何以成为一个独立的学科	(1)	2.2 矩形波导	(43)
0.3 微波的应用	(2)	2.2.1 分离变量法	(43)
0.4 微波技术的内容及研究的方法	(6)	2.2.2 矩形波导的传输特性	(46)
思考题	(6)	2.3 矩形波导的 TE_{10} 波	(48)
1 传输线理论	(7)	2.3.1 场结构	(48)
1.1 引言	(7)	2.3.2 壁面电流	(50)
1.2 传输线方程及其解	(8)	2.3.3 传输功率与功率容量	(51)
1.2.1 双导体传输线	(8)	2.3.4 波导的损耗与衰减	(52)
1.2.2 电报方程的解	(9)	2.3.5 矩形波导尺寸的选择	(54)
1.3 无损耗线上的行波与驻波		2.4 圆波导	(54)
驻波比与反射系数	(11)	2.4.1 场方程	(55)
1.3.1 行波	(11)	2.4.2 圆波导的传输特性	(58)
1.3.2 驻波	(12)	2.4.3 圆波导的三个主要模式	(59)
1.3.3 驻波比与反射系数	(13)	2.5 同轴线	(60)
1.3.4 无损耗线上任一点的输入 阻抗	(14)	2.5.1 TEM 波	(61)
1.4 不同负载时传输线的工作状态	(14)	2.5.2 TM 波和 TE 波	(62)
1.4.1 匹配工作状态	(15)	2.5.3 传输功率和损耗	(63)
1.4.2 短路线	(15)	2.5.4 同轴线尺寸的选择	(63)
1.4.3 开路线	(16)	2.6 其它形式的微波传输线	(64)
1.4.4 纯阻性负载传输线	(17)	2.6.1 脊形波导	(64)
1.4.5 阻抗负载传输线	(18)	2.6.2 加鳍波导	(65)
1.5 圆图及其应用	(19)	2.6.3 介质波导	(66)
1.5.1 圆图的构成	(19)	2.7 波的激励与耦合	(67)
1.5.2 阻抗圆图的特点	(21)	2.7.1 电激励	(67)
1.5.3 导纳圆图	(23)	2.7.2 磁激励	(68)
1.5.4 圆图应用举例	(24)	2.7.3 孔、缝激励	(68)
1.6 有耗传输线	(30)	2.8 光波导	(68)
1.6.1 有耗线的特性参数	(30)	2.8.1 光纤的类型	(69)
1.6.2 有耗线上电压与电流的分布	(31)	2.8.2 光纤的主要参量	(70)
1.6.3 有耗线的圆图	(32)	2.8.3 光纤通信	(71)
1.6.4 传输线效率的计算	(33)	习题	(71)
1.7 非均匀分布参量传输线	(34)	3 微波谐振腔	(74)
习题	(37)	3.1 谐振回路的基本性质	(74)
		3.1.1 谐振回路中的储能	(74)

3.1.2 品质因数与谐振频率	(75)	4.6 基本电路单元网络参量	(113)
3.1.3 有载品质因数 Q_L	(76)	4.7 双端口网络的工作特性参量	(114)
3.2 微波谐振器的基本参数	(76)	习题	(117)
3.2.1 谐振波长 λ_0	(77)	5 微波元件	(120)
3.2.2 微波谐振腔的品质因数	(77)	5.1 全匹配负载	(120)
3.3 矩形金属谐振腔	(79)	5.2 电抗元件	(120)
3.3.1 矩形谐振腔中的振荡模	(79)	5.2.1 膜片	(120)
3.3.2 矩形谐振腔的谐振波长 λ_0	(80)	5.2.2 调谐螺钉	(121)
3.3.3 矩形谐振腔的主模 TE_{101}	(80)	5.2.3 短路活塞	(122)
3.4 圆柱形谐振腔	(82)	5.3 连接元件	(123)
3.4.1 圆柱形谐振腔的电磁场方程	(82)	5.4 分支元件	(123)
3.4.2 圆柱形谐振腔的谐振波长及 空载品质因数	(83)	5.4.1 E面分支	(124)
3.4.3 圆柱形谐振腔常用的几种 振荡模	(84)	5.4.2 H面分支	(124)
3.4.4 圆柱形谐振腔的模式图	(86)	5.4.3 双T分支及魔T	(125)
3.5 同轴谐振腔	(87)	5.5 衰减器	(128)
3.6 介质谐振腔	(88)	5.5.1 吸收式衰减器	(128)
3.7 谐振腔的等效电路及腔的 激励与耦合	(90)	5.5.2 旋转式极化衰减器	(128)
3.7.1 谐振腔的等效电路	(90)	5.5.3 过极限衰减器	(129)
3.7.2 耦合谐振腔的等效电路 及其参量	(91)	5.6 波型与极化的变换	(130)
3.8 谐振腔的微扰	(93)	5.6.1 方-圆变换器	(130)
习题	(94)	5.6.2 线-圆极化变换器	(131)
4 微波网络基础	(96)	5.6.3 极化复用与极化分离器	(131)
4.1 引言	(96)	5.7 定向耦合器	(132)
4.2 波导等效为双线	(96)	5.7.1 定向耦合器的技术指标	(132)
4.2.1 等效的基础	(97)	5.7.2 双孔定向耦合器	(133)
4.2.2 矩形波导 TE_{10} 波的 等效阻抗 Z_e	(97)	5.7.3 单孔定向耦合器	(134)
4.2.3 电压、电流和阻抗的归一化	(98)	5.7.4 双十字槽孔定向耦合器	(135)
4.3 微波网络的主要特点	(100)	5.8 微波铁氧体元件	(137)
4.4 微波网络参量	(101)	5.8.1 场移式隔离器	(137)
4.4.1 阻抗参量 Z	(101)	5.8.2 Y型结环行器	(139)
4.4.2 导纳参量 Y	(102)	习题	(140)
4.4.3 转移参量 A	(103)	6 微带传输线	(142)
4.4.4 散射参量 S	(105)	6.1 带状线	(142)
4.4.5 传输参量 T	(107)	6.1.1 带状线的特性阻抗	(143)
4.4.6 双端口网络各种矩阵间 的关系	(108)	6.1.2 带状线的损耗与衰减	(145)
4.5 网络参量的本征方程、 本征值和本征矢	(110)	6.1.3 带状线的功率容量	(146)
		6.1.4 带状线尺寸的选择	(146)
		6.2 微带线	(147)
		6.2.1 微带线中的模式	(147)
		6.2.2 微带线的特性阻抗 Z_0 和 相速 v_p	(148)
		6.2.3 微带线的损耗	(152)
		6.3 耦合线	(155)

6.3.1 耦合带状线	(155)	8.4.1 阻抗测量线法	(208)
6.3.2 耦合微带线	(159)	8.4.2 电桥法	(209)
6.4 微带元件	(164)	8.5 微波检测	(210)
6.4.1 短路与开路微带线的 等效电路	(164)	习题	(212)
6.4.2 串联电感和并联电容 的实现	(165)	9 微波加热与微波辐射的安全防护	(213)
6.4.3 微带线中的不连续性	(167)	9.1 微波的热效应及微波加热的 特点	(213)
6.5 微带功分器	(169)	9.2 微波加热设备	(214)
6.6 微带线定向耦合器	(172)	9.3 微波加热在工业上的应用	(215)
6.7 微带线环行器	(176)	9.4 微波在农业和林业上的应用	(216)
6.8 微带线谐振器	(177)	9.5 微波在医疗卫生方面的应用	(216)
习题	(179)	9.6 微波在工业、科研、医疗方面 应用的频率分配(ISM)	(217)
7 微波振荡器	(180)	9.7 微波辐射的安全防护	(218)
7.1 反射速调管振荡器	(180)	10 天线	(220)
7.1.1 反射速调管振荡器工作 简介	(180)	10.1 概述	(220)
7.1.2 电子流的速度调制	(181)	10.2 电流元的辐射	(221)
7.1.3 电子流的群聚	(181)	10.3 对偶原理与磁流元的辐射	(223)
7.1.4 激励振荡的相位条件	(182)	10.3.1 对偶原理	(223)
7.1.5 反射速调管的调谐	(183)	10.3.2 磁流元的辐射	(223)
7.2 磁控管振荡器	(184)	10.3.3 小电流环的辐射	(224)
7.3 微波固态振荡器	(187)	10.4 面元的辐射	(225)
7.3.1 体效应管振荡器	(187)	10.5 对称振子的辐射	(227)
7.3.2 微波晶体管振荡器	(189)	10.5.1 对称振子辐射场的计算	(227)
习题	(196)	10.5.2 对称振子的方向图	(228)
8 微波测量	(197)	10.5.3 对称振子的辐射功率与 辐射电阻	(229)
8.1 微波功率测量	(197)	10.6 发射天线的基本电参数	(231)
8.1.1 大功率测量——热量计	(197)	10.6.1 天线的方向图	(231)
8.1.2 小功率测量——热敏电阻式 功率计	(198)	10.6.2 天线的方向性系数 D	(232)
8.1.3 热电偶式小功率计	(199)	10.6.3 天线的增益及效率	(234)
8.1.4 微波功率的检测与指示	(200)	10.6.4 天线的输入阻抗	(235)
8.2 驻波系数的测量	(201)	10.6.5 天线的极化特性	(238)
8.2.1 驻波测量线	(202)	10.6.6 天线的工作带宽	(239)
8.2.2 直接法	(203)	10.7 接收天线	(239)
8.2.3 等指示度法	(203)	10.7.1 接收天线的有效长度	(240)
8.2.4 反射计法	(205)	10.7.2 接收天线的等效电路及 其输出的最大功率	(240)
8.2.5 晶体检波器的校准	(205)	10.7.3 有效面积 S_e	(241)
8.3 波长和频率的测量	(206)	10.7.4 天线的噪声温度	(241)
8.3.1 波长的测量	(206)	10.8 线天线阵	(242)
8.3.2 用谐振式频率计测量频率	(207)	10.8.1 二元阵	(242)
8.4 阻抗测量	(208)	10.8.2 均匀直线式天线阵	(245)

10.8.3 反射面的影响	(250)	11.2 长波、中波的地面波传播	(345)
10.9 行波天线	(260)	11.2.1 传播机理	(345)
10.9.1 行波单导线天线	(260)	11.2.2 地面的电参数	(346)
10.9.2 菱形天线	(261)	11.2.3 电波在自由空间的衰减	(346)
10.9.3 螺旋天线	(262)	11.2.4 地面波场强的计算	(348)
10.10 引向天线(八木天线)	(264)	11.3 短波的电离层传播	(351)
10.10.1 引向天线的工作原理	(264)	11.3.1 电离层简介	(352)
10.10.2 对引向天线的分析	(265)	11.3.2 电离层的电参量	(353)
10.10.1 引向天线的设计	(268)	11.3.3 电波从电离层反射的条件	(354)
10.11 极宽频带天线	(271)	11.3.4 电离层探测与频高图	(355)
10.11.1 平面等角螺旋天线	(271)	11.3.5 电离层对电波的吸收与 最低可用频率	(356)
10.11.2 圆锥等角螺旋天线	(273)	11.3.6 短波的衰落特性	(357)
10.11.3 对数周期天线	(274)	11.3.7 短波的频率预测	(358)
10.12 线天线的馈电	(276)	11.4 超短波的空间波传播	(366)
10.12.1 对馈电系统的要求	(276)	11.4.1 视距	(366)
10.12.2 馈线的种类及其特性 阻抗	(277)	11.4.2 光滑平地面场强的计算	(367)
10.12.3 长中波天线的馈电	(279)	11.4.3 球形地面场强的计算	(368)
10.12.4 短波天线的馈电	(281)	11.4.4 夫涅尔区与夫涅尔半径	(374)
10.12.5 超短波天线的馈电	(282)	11.4.5 雷利准则与传播余隙	(376)
10.13 电视发射天线	(287)	11.4.6 山峰绕射	(378)
10.13.1 对电视发射天线的要求	(287)	11.5 地面移动通信中的电波传播	(379)
10.13.2 十字形旋转场天线	(287)	11.5.1 陆上移动无线电通信网 简介	(380)
10.13.3 蝙蝠翼天线	(289)	11.5.2 移动通信中电波传播的 特点	(380)
10.13.4 反射板偶极天线阵	(290)	11.6 微波通信中的电波传播	(381)
10.14 面状天线	(292)	11.6.1 地形对微波传播的影响	(381)
10.14.1 面状天线理论的基本 问题	(292)	11.6.2 大气对微波传播的影响	(383)
10.14.2 不同口面场分布的辐射场	(294)	11.6.3 传播余隙的选取	(384)
10.14.3 喇叭天线	(304)	11.6.4 微波通信中的衰落与 抗衰落	(384)
10.14.4 旋转抛物面天线	(308)	习题	(388)
10.14.5 卡塞格伦天线	(319)	附录1 同轴线参数表	(390)
10.14.6 高效率馈源	(322)	附录2 波导参数表	(392)
10.15 缝隙天线与微带天线	(326)	附录3 常用导体材料的特性	(394)
10.15.1 理想缝隙天线	(326)	附录4 常用介质基片材料的高频特性	(395)
10.15.2 矩形波导缝隙天线	(328)	附录5 微带线常用导体材料的特性	(395)
10.15.3 波导缝隙天线阵	(330)	参考资料	(396)
10.15.4 微带天线	(332)		
习题	(339)		
11 无线电波传播	(345)		
11.1 引言	(345)		

0 绪论

0.1 什么是微波

微波是无线电波中波长最短的电磁波,它包括从 1 m 到 0.1 mm 的波长范围,其相应的频率范围从 300 MHz ~ 3 000 GHz。通常又将它划分为 4 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	1 m ~ 10 cm	0.3 ~ 3	超高频 UHF
厘米波	10 cm ~ 1 cm	3 ~ 30	特高频 SHF
毫米波	10 mm ~ 1 mm	30 ~ 300	极高频 EHF
亚毫米波	10 mm ~ 0.1 mm	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 0-2 微波波段的划分及其代号

波段代号	频率范围/GHz	波段代号	频率范围/GHz
UHF	0.3 ~ 1.12	Ka	26.5 ~ 40
L	1.12 ~ 1.7	Q	33 ~ 50
LS	1.7 ~ 2.6	U	40 ~ 60
S	2.6 ~ 3.95	M	50 ~ 75
C	3.95 ~ 5.85	E	60 ~ 90
XC	5.85 ~ 8.2	F	90 ~ 140
X	8.2 ~ 12.4	G	140 ~ 220
Ku	12.4 ~ 18	R	220 ~ 325
K	18 ~ 26.5		

0.2 微波何以成为一个独立的学科

微波与其它波段的无线电波相比具有如下的特点:

①微波的波长极短,它与所使用的元件、设备的尺寸可相比拟。在低频无线电技术中,

因为线路尺寸总是甚小于波长,所以,在同一时刻流过某一元件的电流是处处相同的,元件的参数是“集中”在一起的,称之为集中参数。而到了微波波段,即使在几厘米的导线上各点的电流也可有显著的不同。此时,元件的参数是沿空间分布的,称之为分布参数。研究这样的系统必须用“分布参数”的观点。而且,普通的集中参数元件(如电阻、电容、电感)已不能应用,代之的是波导管、谐振腔等分布参数的元部件。

②微波的振荡周期(为 $10^{-9} \sim 10^{-12}\text{s}$)极短。它与电子在电子管内的渡越时间(电子从阴极发射到达板极的时间,一般约为 10^{-9}s 量级)可以比拟。因此,普通的静电控制的电子器件在微波波段已不能有效地工作,代之的是在原理和构造上完全不同的微波电子器件——速调管、磁控管和行波管等。

③似光性。微波介于一般无线电波与光波之间,它不仅具有无线电波的性质,还具有光波的某些性质:以光速直线传播;有反射、折射、绕射、干涉等现象;某些几何光学原理(如惠更斯原理、镜像原理、透镜聚焦可获定向窄波束辐射、多普勒效应等)仍然适用。雷达能发现与跟踪目标就是基于这些特性。

④微波的频率很高,因此在不大的相对带宽下,其可用带宽很宽,可达数百兆赫至数十千兆赫,故信息容量大,有巨大的信息潜力。且微波波段的电磁波能穿透电离层,因而卫星通信与卫星电视广播、宇宙通信及射电天文学的研究等均需利用微波来实现。

由于微波具有上述的一些独特的特点,使微波技术在通信、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的分支。

0.3 微波的应用

早在 1888 年,德国物理学家赫兹用莱顿瓶放电的实验证实了麦克斯韦预言的电磁波的存在。赫兹实验产生的是一种分米波频段的电磁波,这实质上开创了微波技术的起点。然而,直到 20 世纪 30 年代发明了连续波发生器,并研制了金属波导管和空腔谐振器以后,微波技术才开始迅速地发展起来。

自 1931 年架设了世界上第一条微波通信线路,1935 年研制了军用雷达以后,微波技术主要在雷达及通信领域上得到了广泛的应用。尤其是第二次世界大战期间,军事上的需要,促使微波器件及微波技术极大地发展。战后的几十年,微波技术逐渐地向其它的工程技术部门渗透而应用于诸如导航、电子对抗、空间技术、遥测与遥感等。

微波作为信息的载体在许多工程技术领域得到迅速发展的同时,人们还发现了微波的热效应和微波的生物效应。利用微波的热效应开辟了利用微波能来对各种物料进行加热处理的“微波加热”技术。目前微波加热已在国民经济的许多部门得到了越来越广泛的应用,诸如工业上微波加热,农业上的谷物烘干、种子灭菌,医疗上的微波理疗,利用微波的生物效应来治疗疾病和改良作物品种等。

微波还以它蓬勃的生命力与一些产业相结合,形成一些新的边缘学科。如微波气象学、微波射电天文学、微波波谱学、微波生物学等。

要全面地论述微波技术的应用是困难的,因为它渗透的技术领域与日俱增。这里简略

介绍微波在通信及雷达中的应用。

(1)微波通信与卫星通信

现代社会人们对信息的需求在急剧地膨胀,传输和获取更多更大的信息量是社会发展的必然。

回顾无线电通信的历史,其发展的一个趋势就是逐渐提高工作频率。这是因为工作频率越高,其信息容量就越大。到了微波频段,即使对于很宽带宽的电视信号,也可以实现多路传输。微波通信除了具有信息容量大的特点外,还由于其波长短,相应的天线可以构造得具有很大的电尺寸,因而能实现天线的高增益和锐方向性,从而降低对发射机输出功率的要求,而与低噪声接收机相配合,可以实现超远距离微弱信号的接收;微波波段的通信受工业、天电和宇宙等外界干扰较小,可使通信质量得以提高;此外,由于低频无线电波不能穿透电离层,而微波通过电离层时受到的衰减不大,因而卫星通信和宇宙通信非采用微波不可。由于微波通信具有上述优点,因而成为当今社会的主要通信手段之一。

对于微波频段的电磁波,它在空间传播时是沿直线传播。而地球是一个球体,地球的曲率半径使微波在地面上的直线传播距离仅限于数十公里的范围之内。为了增大通信距离,而采用相隔数十公里(通常为 50 公里左右)设一微波中继站,将受衰减了的信号放大,再一

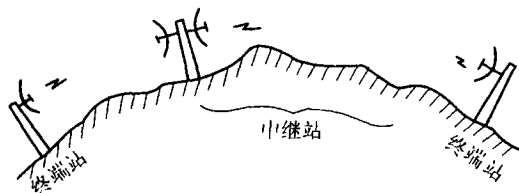


图 0-1 微波中继通信示意图

站一站地传送下去,从而实现远距离通信。图 0-1 表示一条微波中继线路,它包括位于终端的两个终端站、位于中间的若干个中继站(或枢纽站)。每个中继站均包括有接收设备和发射设备,如图 0-2 所示。

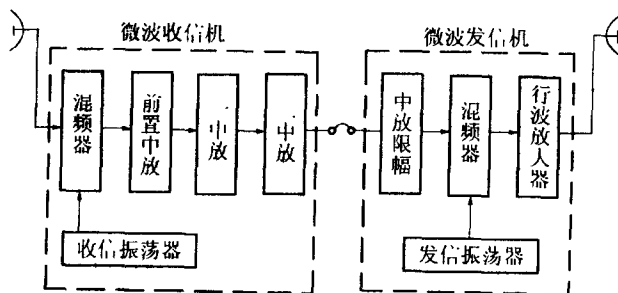


图 0-2 微波中继设备方框图

在接收设备中,将接收到的信号变为中频信号(例如 70 MHz 或 140 MHz)进行放大,再送到发信设备将其变换到另一载波频率并放大到预定的电平,最后由天线往下个中继站或终端站发射。为了避免收发间的互相干扰,接收和发射一般采用不同的频率。

微波中继通信的特点是:通带宽,可传送多路电话、电视和数据通信,例如 4.6 GHz 频段,可以双向传输的话路数可达一万至几万条;传输质量好,工作稳定,比短波通信保密性好;既可用于长距离干线通信,也可用于省内短距离通信;和有线通信相比,有较大的机动灵活性,能较快地建立通信联络;与电缆通信相比,具有建设速度快、投资较省、节约大量有色金属等优点。

利用人造卫星作为中继站的通信称为卫星通信;利用人造卫星作为转发站的电视广播则称为卫星电视广播。它们具有通信距离远、服务区大、传输的信息容量大、可靠性高、图像质量好、灵活性强以及可实现多址通信等优点。它既是国际又是国内通信和广播的重要方式之一。目前,普遍采用的是同步卫星通信和同步卫星广播。所谓同步卫星,就是卫星绕地球运转一周的时间与地球自转一周的时间是相同的(每转一周为 23 小时 56 分 4 秒),即两者的角速度是相同的。因此,从地球上任何一点看卫星都是静止不动的,故称之为同步卫星。它在地球赤道上空 35 786 km 处,如图 0-3 所示,只要用三颗同步卫星在地球赤道上空等间隔地向地球发射宽度为 $17^\circ \sim 18^\circ$ 的波束,即可覆盖整个地球,从而实现全球通信或广播。

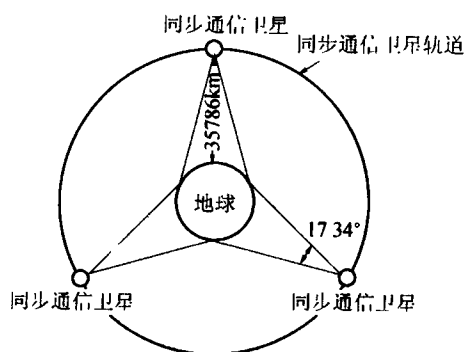


图 0-3 同步卫星实现全球通信

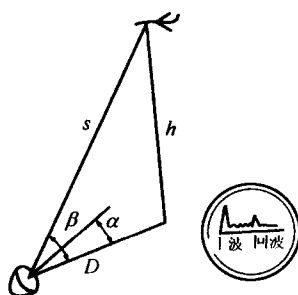


图 0-4 雷达定位原理

(2) 雷达

“雷达”意为无线电定位。传统的雷达设备的工作原理如图 0-4 所示。雷达之所以能测定目标的方位和距离,是因为雷达发射机发射的无线电波若遇物体会发生反射回波,回波被雷达接收机所接收并在雷达显示荧屏上显示发射脉冲和回波脉冲,通过测量脉冲间的间隔便可知电波由发射机直至返回雷达接收机所经过的时间,由下式

$$s = \frac{1}{2} v_0 t$$

计算出被测物体的距离。式中, s 为被测目标的距离; v_0 为空气中电波传播的速度,即光速; t 为电波从发射机发出传至目标再返回雷达接收机所经的时间。再利用三角关系,可由距离 s 、仰角 β 求出目标的水平距离 D 和高度 h 。目标的方位可根据波束中心轴向的位置确定。

雷达作为一种测量设备,最早和最大的应用是在军事上。按其功能与用途的不同有:警戒雷达、指挥雷达、炮瞄雷达、靶场测量雷达、导弹引导雷达、气象雷达、防撞雷达等。如按工作体制或信号加工方式分类有:连续波雷达、脉冲雷达、脉冲多普勒雷达和目标显示雷达。

如按工作频段分类有:短波雷达、米波雷达、分米波雷达、厘米波雷达、毫米波雷达、亚毫米波雷达和激光雷达等。大多数雷达工作于超短波或微波波段。

在雷达的回波信号(包括频率、相位、振幅、时延等)中,存在许多有用的信息,它包含着被测物体更精细的结构及物理特性。雷达测量具有许多独特的优点,如测量距离远、全天候、实时性、穿透性以及物体对微波频段特有的反射特性等,这是光学方法和其它测量方法所不及的。因此,雷达技术越来越广泛地应用于民用方面,如民用航空、航海、气象、卫星通信与广播、遥感、城市交通及其它方面。利用多普勒效应制成的雷达可广泛地用于鉴别运动目标与固定目标,或直接测量运动目标的速度。所谓多普勒效应是指发射源和接收者之间有相对径向运动时,接收到的信号频率将发生变化。其发射的频率与接收的频率之差称为多普勒频率 f_D ,可用下式计算:

$$f_D = \frac{2v}{c} f_0 \cos \alpha$$

式中, f_0 为发射频率; v 为接收者(被探测物)的运动速度; c 为光速; α 为雷达天线电轴与运动物之间的夹角。

例如车辆测速雷达,这是一种小型连续波多普勒雷达装置。它用以测量车辆行驶速度,这种装置目前已广泛用于公路交通管理中。它使用 X 波段或 K 波段。根据测出的 f_D 可得出目标速度 v ,并被专门的装置指示和记录下来。在铁道机车底部安装测速雷达,天线以一定角度对着地面,通过测量多普勒频移量来确定机车的速度。如将一部小型的收发天线分开的连续波多普勒雷达安装于自动门上,对于正常人的步行速度,它可产生几十赫以上的多普勒频率,由此产生开门控制信号。当人离开或静止不动时,几秒钟后就能自动恢复原状(关门)。这种微波自动门已广泛地应用于宾馆、空调车间以及手术室的大门控制。利用多普勒效应还可以做成微波防盗报警装置。

利用被测物体的介电常数、导磁系数、电阻率与周围物质的差异而产生的反射信号,可制成探地雷达、汽车雷达等。探地雷达可用来查找地下电缆、财宝、古墓,检查道路、桥梁及机场跑道的混凝土质量,测量冰层、泥土、岩石、地下水的深度,提供有害物的侵染范围,调查土壤情况,进行地质剖面、河湖底质剖面、断层、裂缝的测绘以及管道、空洞、隧道、岩床、泥炭位置的确定等。雷达探测具有高分辨率、实时处理和非破坏性等优点,因而自 70 年代就已经得到了广泛的应用。目前,随着成像技术的发展,在探地雷达方面也向高分辨率和成像方面发展。

此外,值得一提的是卫星导航全球定位系统(GPS),它是 90 年代发展起来的一种高精度的新型的卫星导航与定位系统。该系统是由 18 颗高度为 26500 km 的卫星实现全球覆盖。每颗卫星发射两种伪随机码扩频信号(P 码为军码,C/A 码为民码)运载体搜索并有选择地跟踪 4 颗卫星发射的信号,以码分形式区分 4 颗卫星的信号。从信号中提取星历,测量信号到达时间。经迭代定位计算,就可求得运载体自身所在位置及精确的时间。从信号中提取多普勒频移量,就能得到运载体的三维速度。这种导航系统能向运载体提供七维导航数据(即三维位置、三维速度及时间)。由于其使用方便,定位精度高,应用范围广,因而自它出现以来广受欢迎。它不仅适用于海陆空各种运载体,也适用于外层空间的各种运载体。这种系统的工作频率为 1.2276 GHz 和 1.57542 GHz。

0.4 微波技术的内容及研究的方法

微波技术所研究的内容包括微波的产生、放大、传输、变换、检测、测量、发射与接收,以及与之相对应的微波元器件和设备等。

本书共 11 章。第 1 章从“路论”的观点研究普通的 TEM 波传输线,给出传输线的基本概念、传输特性、计算公式及应用圆图解决匹配问题,这一章是微波传输线的基础;第 2 章微波传输线介绍规则金属波导管的传输特性,建立波型理论;第 3 章微波谐振腔介绍微波谐振器的工作原理及其主要参量的计算方法;第 4 章微波网络基础研究微波网络参量,介绍适用不同情况的 5 种网络参量,着重阐述散射参量;第 5 章微波元件介绍常用波导元件的工作特性;第 6 章微带传输线介绍微带传输线及微带元件,这一章是近代微波设备向小型化、集成化、智能化发展的基础;第 7 章简要介绍反射速调管振荡器、磁控管振荡器及固态振荡器;第 8 章介绍微波测量原理及方法;第 9 章介绍微波加热原理及微波辐射的安全防护;第 10 章介绍辐射理论、各种常用的线天线及面天线的特性;第 11 章介绍各个波段电波传播的特点及其场强的计算方法。

在微波技术、天线与电波传播中所涉及的理论问题,基本上属于电磁场的范畴,必须根据经典的电磁场与波的理论进行研究,即根据麦克斯韦方程对各种特定的边值问题进行求解,这就是人们常说的“场解”。这一方法对规则的边界条件可以得到严格的解析解,但对复杂的边界条件,其求解过程往往非常繁杂、冗长,甚至难以得到其解。因此,对于一些本质上是属于场的问题,但在一定条件下可以转化为电路的问题,可以应用“路论”的方法进行求解。微波网络一章就是化“场”为“路”进行分析的。所以,在研究工程中的电磁场问题时,常常将“场解法”与“路论法”结合起来使用。

本书的内容涵盖微波技术、天线及电波传播,涉及高频电磁场的主要工程技术领域,内容相当丰富。相信通过这一课程的学习,能为读者今后从事高频电磁场的工作打下必要的基础。

思考题

- 0-1 什么是微波?
- 0-2 微波有哪些特点?
- 0-3 微波有哪些主要的应用?

1 传输线理论

1.1 引言

麦克斯韦方程揭示了电能和磁能的交换将在空间中产生电磁波传播的客观规律。对传输线的分析表明,电磁波也能沿导体或介质的边界传播,产生由这些导体或介质的边界所导引的波,从而将信号源的电磁能量以被导引波的形式传送至某一系统或负载中去。

图 1-1 表示常用的一些传输线。按其传送的场的分布状态可分为三大类:① TEM 波传输线;② TE 波和 TM 波传输线;③ 混合波传输线。

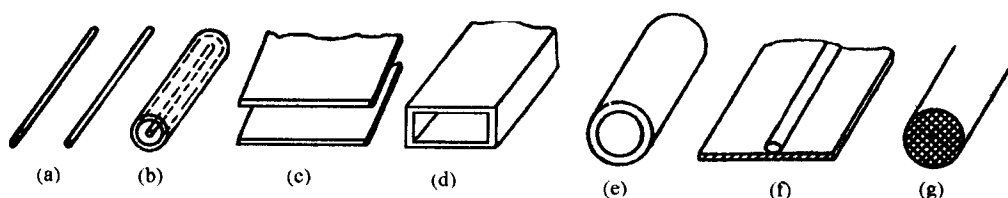


图 1-1 常用的几种传输线

(a) 平行双线; (b) 同轴线; (c) 平板线; (d) 矩形波导; (e) 圆波导; (f) 镜像线; (g) 介质棒

传送 TEM 波时,电场分量和磁场分量均与传播方向垂直,即在传播方向上既没有电场分量,也没有磁场分量。属于这一类传输线的如图 1-1 中的(a)平行双线、(b)同轴线和(c)平板线。其应用的频率范围很宽,可从最低的直流直至微波频率。

传送 TE 波和 TM 波时,在传输方向上有磁场分量或电场分量,图 1-1 中的(d)矩形波导和(e)圆波导属于这一类。

图(f)镜像线和(g)介质棒属于混合型传输线。这一类传输线在传输方向上既有电场分量也有磁场分量,电磁波沿线的表面传输,故也称为表面波传输线。

通常“传输线”一词是指传送 TEM 波的双导体式传输线,而把传送高阶型的波导线和表面波传输线等特指为微波传输线。本章只研究 TEM 波传输的理论,即长线理论,所得结果可以推广应用到微波传输线。此外,解决传输线问题所用的理论和方法,很容易推广应用于其它波动现象的研究,因此对本章的学习十分重要。

1.2 传输线方程及其解

1.2.1 双导体传输线

图 1-2(a)表示一平行双导体传输线。在传输线的始端加上激励电压时,平行的两导体中就有大小相等方向相反的电流通过。如果激励电压是时变的,则沿导体的电压和电流既是沿线空间坐标的函数,也是时间的函数,用 $U(z, t)$ 和 $I(z, t)$ 表示,或简写为 U 和 I 。

在本书的上册中,已经讨论了如何由传输线的几何参量求出它的特性阻抗、衰减常数等参数。有关参量可参阅第十章。这里,将根据已知的这些传输线参数研究电磁波如何沿传输线传播的问题。由于 TEM 波的电场和磁场沿传输线的传播单值地对应着电压波和电流波,故下面将由分布参数电路理论讨论传输线上电压和电流的分布状态,并分析其重要特性。

大家知道,电流流过传输线将使导体发热,这表明导体本身有分布电阻;电流流过导体其周围将有磁场,表明导体本身有分布电感;由于导体间绝缘不完善而存在漏电流,表明导体间有分布漏电阻;由于导体间有电压,其间便有电场,这表明导体间有分布电容。基于上述的物理事实,便可得出图 1-2(b)的传输线的电路模型。注意到电压 $U(z, t)$ 是指双线对于同一 z 坐标的对应点间的电压,而 $I(z, t)$ 是指其中一个导体的电流(通常指上一个导体),而且串联支路的等效参量只在一边画出。

图中: R_0 为单位长度的分布电阻,单位为 Ω/m (欧每米); L_0 为单位长度的分布电感,单位为 H/m (亨每米); G_0 为单位长度的分布电导,单位为 S/m (西每米); C_0 为单位长度的分布电容,单位为 F/m (法每米)。

若只考虑谐波稳态场(角频率为 ω)的情况,则可用

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= R_0 + j\omega L_0 \\ Y_0 &= G_0 + j\omega C_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

分别表示每单位长度的串联阻抗和并联导纳。

现取一微分长度 dz , 其输入端的电压和电流分别为 U 和 I , 而输出端的电压和电流分别为 $U + \Delta U$ 和 $I + \Delta I$ 。注意到电压的变化是由电流流经串联支路阻抗 $Z_0 dz$ 引起的, 而电流的变化是由于跨接于线间的并联导纳 $Y_0 dz$ 引起的, 故有

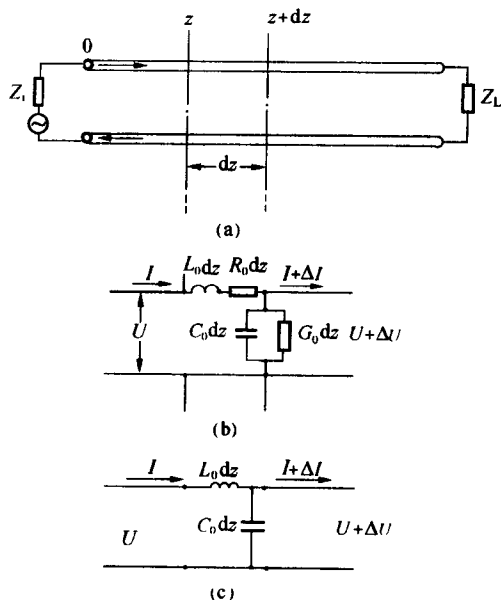


图 1-2 双线传输线及其等效电路