

邮·电·中·等·专·业·学·校·试·用·教·材

微波技术基础

张济楫 黄全杰 编 徐承和 审



人民邮电出版社

邮电中等专业学校教材

微波技术基础

张济楫 黄全杰 编
徐承和 审

人民邮电出版社

登记证号(京)143号

内 容 提 要

本书是邮电中专无线电专业使用的教材。首先从静电场开始讲述了电磁场的基本原理,低频线性网络,第三章开始讨论了微波传输线,随后介绍了微波基本元件、微波谐振腔、微波滤波器均衡器以及微波铁氧体元件等,最后介绍了微波天线与馈线。

本书也可供从事微波通信的技术人员参考学习之用。

邮电中等专业学校教材

微波技术基础

张济楫 黄全杰 编

徐承和 审

•

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京东长安街27号

人民邮电出版社河北印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

•

开本: 787×1092 1/32 1992年6月 第 一 版

印张: 20 24/32 页数: 332 1992年6月河北第1次印刷

字数: 477千字 插页: 1 印数: 1-6 000 册

ISBN 7-115-04643-3/G·149

定价: 5.05元

前 言

本书是邮电中等专业学校用书。为了适应邮电教育事业发展的需要，我司自1978年以来，先后成立了邮电中专教材编审委员会及基础课和专业课教材编审组（或小组），全面开展了教材编审活动。到目前为止第一轮邮电中专试用教材已基本上出齐。自1982年开始了各编审组（或小组）对试用几年的教材进行了总结，对原教学大纲进行了修订，并在此基础上，对各课程的邮电中专试用教材作了比较全面的修改和补充。以适应当前邮电技术的发展。我们在几年内，将修改后的教材陆续出版，以满足邮电中等专业学校的教学需要。编写教材，是提高教学质量的关键。我们组织编写本教材时，力求以马列主义、毛泽东思想为指导，努力运用辩证唯物主义的观点阐明科学技术的规律，内容上注意了少而精，尽量反映科学技术的新成就。书内难免存在缺点和错误。希望有关教师和同学在使用过程中，把发现的问题提给我们以便修改提高。

邮电部教育司

编 者 的 话

本书是根据《微波技术基础》新编教学大纲编写的邮电中专统编教材，供无线电专业使用。本课程任务是为学习本专业后续课程打下必要的理论基础。本书内容共分八章。第一章重点是恒定电流场、恒定电流磁场以及时变场，静电场为复习内容，如课时不足可以不讲授；第二章讨论的是低频线性网络，它是微波网络的基础；第三章是从路的理论讨论低频传输线过渡到以场的理论讨论微波传输线的电特性；第四、五和第六章都是讨论微波多路中继通信中常用的微波基本元件的电特性；第七章讨论微波铁氧体元件，它是一种性能优越的微波元件；第八章是微波天线和馈线，它讨论了微波多路通信的微波信号如何从天线接收下来，经过馈线送到收信机架，同时又如何从发信机架通过相同的馈线和天线向空中辐射。

本书对基本概念和基本原理，力求定性地阐明它们的物理意义，同时又使用本专业前期课程学习过的数学工具，以帮助全面理解。

本书的第二、五、六和第八章由贵州省邮电学校黄全杰同志执笔；绪论、第一、三、四和第七章由贵州省邮电学校张济楫同志执笔，并由张济楫同志统编全书。全稿承北京大学无线电系徐承和教授审校。

编者水平有限，谬误之处在所难免，敬希读者指正。

目 录

绪论	(1)
第一章 电磁场基本原理	(11)
第一节 静电场	(11)
一、库仑定律	(12)
二、电场强度	(14)
三、高斯通量定律	(17)
四、静电场中的导体和电介质	(24)
五、电位移 电位移通量	(28)
六、静电场的能量守恒定理	(32)
七、电位 电位差 等位面	(34)
八、电场的能量	(39)
第二节 恒定电流场 恒定电流磁场	(40)
一、电流密度	(41)
二、欧姆定律的微分形式	(42)
三、磁感应强度 B	(43)
四、磁感应线 磁通连续性原理	(47)
五、毕奥—沙瓦定律	(50)
六、安培环路定律	(53)
七、磁介质对磁感应强度的影响	(57)
八、磁场强度	(59)
九、磁场的能量	(61)
第三节 时变场	(62)

一、电磁感应定律.....	(63)
二、安培环路定律的推广.....	(65)
三、麦克斯韦方程组.....	(69)
四、边界条件.....	(73)
五、电磁波传播概述.....	(80)
思考题和习题.....	(89)
第二章 低频线性网络	(92)
第一节 概述.....	(92)
第二节 四端网络.....	(93)
一、四端网络的一般概念.....	(93)
二、四端网络的输入阻抗.....	(96)
三、四端网络的特性阻抗.....	(98)
四、四端网络的固有传输常数.....	(102)
五、中分定理.....	(104)
六、衰耗器.....	(106)
第三节 二端网络.....	(116)
一、二端网络的一般概念.....	(116)
二、电抗二端网络的阻抗频率特性.....	(116)
三、电抗二端网络的等效和倒置.....	(122)
第四节 低频滤波器.....	(129)
一、滤波器的一般概念.....	(129)
二、梯型滤波器的传递条件.....	(131)
三、 K 式滤波器.....	(132)
四、 m 式滤波器.....	(137)
五、复合滤波器.....	(148)
第五节 均衡器.....	(150)
一、衰耗均衡器.....	(150)

二、相位均衡器	(158)
思考题和习题	(164)
第三章 微波传输线	(167)
第一节 概述	(167)
第二节 平行双线和同轴线— <i>TEM</i> 波传输线	(169)
一、平行双线和同轴线	(169)
二、等效电路	(173)
三、传输线方程	(175)
四、传输线方程及其通解	(177)
五、通解的初步讨论	(179)
六、终端匹配时的无耗线	(190)
七、终端短路无耗线和终端开路无耗线	(192)
八、终端接任意负载时的无耗线	(202)
第三节 阻抗圆图及其应用	(213)
一、阻抗圆图的构成原理	(214)
二、阻抗圆图的特点	(224)
三、阻抗圆图的应用	(226)
四、导纳圆图的构成原理、特点及应用	(231)
第四节 矩形波导和圆波导—非 <i>TEM</i> 波传输线	(238)
一、波导传输 非 <i>TEM</i> 波	(239)
二、矩形波导	(240)
三、圆波导	(265)
四、波导的激励与耦合	(274)
第五节 微带—准 <i>TEM</i> 波传输线	(280)
一、微带	(280)
二、微带传输线	(283)
三、耦合微带传输线	(302)

四、激励.....	(311)
思考题和习题.....	(312)
第四章 微波基本元件	(316)
第一节 概述.....	(316)
一、波导的传输特性.....	(317)
二、等效电压 等效电流 等效阻抗.....	(323)
三、波导的等效输入阻抗.....	(325)
四、耦合线节及其等效电路.....	(327)
第二节 阻抗元件.....	(337)
一、微波电阻.....	(337)
二、微波电抗元件.....	(343)
第三节 微波传输线中的转向元件.....	(363)
一、克服波导传输线中不连续性.....	(363)
二、克服微带传输线中不连续性.....	(372)
第四节 阻抗调配及阻抗变换元件.....	(381)
一、阻抗调配.....	(381)
二、阻抗变换器.....	(391)
第五节 定向耦合元件.....	(410)
一、波导定向耦合器.....	(412)
二、耦合线定向耦合器.....	(421)
第六节 转换元件.....	(426)
一、同轴—波导转换器.....	(426)
二、同轴—微带转换器.....	(429)
三、波导—微带转换器.....	(430)
思考题和习题.....	(430)
第五章 微波谐振腔	(433)
第一节 概述.....	(433)

一、低频谐振电路的基本特性·····	(433)
二、谐振腔的基本概念·····	(437)
第二节 谐振腔的基本参量·····	(439)
一、谐振频率 f_0 ·····	(440)
二、固有品质因数 Q_0 值·····	(443)
三、特性阻抗·····	(445)
第三节 矩形谐振腔·····	(446)
一、谐振频率 f_0 ·····	(447)
二、固有品质因数 Q_0 及特性阻抗·····	(448)
第四节 圆柱形谐振腔·····	(449)
一、电磁场分量·····	(449)
二、谐振波长 λ_0 ·····	(449)
三、固有品质因数 Q_0 值·····	(451)
四、 TE_{111} 振荡模·····	(453)
第五节 同轴谐振腔·····	(455)
一、 $\lambda/4$ 同轴谐振腔·····	(457)
二、 $\lambda/2$ 同轴谐振腔·····	(461)
三、电容负载同轴谐振腔·····	(463)
四、耦合和匹配·····	(467)
第六节 微带型谐振器·····	(470)
一、带状线节谐振器·····	(470)
二、微带谐振器·····	(475)
思考题和习题·····	(478)
第六章 微波滤波器和均衡器·····	(479)
第一节 概述·····	(479)
第二节 常用波导结构的滤波器及其等效电路·····	(481)
一、微波带通滤波器·····	(481)

二、微波带阻滤波器·····	(486)
三、微波低通滤波器·····	(491)
第三节 几种不同特性的滤波器·····	(499)
一、滤波特性的表征方式·····	(499)
二、归一化低通原型滤波器的一般概念·····	(501)
三、最平坦低通原型滤波器·····	(505)
四、切比雪夫低通原型滤波器·····	(507)
五、椭圆函数低通原型滤波器·····	(511)
第四节 微波时延均衡器·····	(518)
一、基本结构·····	(518)
二、工作原理·····	(520)
第五节 调测·····	(521)
一、微波带通滤波器的调测·····	(521)
二、微波滤波器损耗指标测试·····	(522)
三、微波带阻滤波器的调测·····	(523)
思考题和习题·····	(524)
第七章 微波铁氧体元件·····	(525)
第一节 概述·····	(525)
第二节 物质的磁性·····	(526)
一、原子磁矩 磁畴·····	(526)
二、陀螺进动·····	(528)
三、电子进动·····	(529)
四、铁氧体的电子进动方程·····	(532)
五、张量磁导率·····	(534)
第三节 旋磁特性·····	(542)
一、铁磁谐振·····	(542)
二、场移效应·····	(551)

三、法拉第旋转效应·····	(552)
第四节 微波铁氧体元件·····	(555)
一、隔离器·····	(556)
二、环行器·····	(561)
第五节 微波铁氧体元件测试·····	(577)
一、输入驻波比测试·····	(577)
二、插入损耗测试·····	(578)
三、反向隔离度测试·····	(580)
思考题·····	(580)
第八章 微波天线与馈线·····	(582)
第一节 概述·····	(582)
第二节 微波天线·····	(583)
一、技术要求·····	(583)
二、常用微波天线·····	(586)
第三节 馈线系统·····	(600)
一、技术要求·····	(600)
二、组成原则·····	(601)
三、极化分离器·····	(606)
四、极化旋转器·····	(609)
五、分路系统·····	(610)
思考题和习题·····	(615)
附录A 关于 TE_{mn} 波的场方程	
附录B 国产矩形波导及扁矩形波导主要参数表	
附录C 国产同轴射频电缆主要电气参数表	
附录D 矩阵的基本运算规则	

绪 论

一、微波波段的划分

微波是指电磁频谱内 $0.3\sim 300\text{GHz}$ 的电磁波。相对于中波和短波波段的波长而言，它的波长要短得多，故称之为微波。微波传输线常用同轴线、波导和微带线，与低频无线电使用的导线不同。微波电路多不使用分立元件，而用分布式电路。微波的这些特点将在下面讨论。近年来，微波的短波长端—毫米波（ $30\sim 300\text{GHz}$ ），在技术和应用上发展迅速，已有把毫米波从微波中分离出来的明显趋势。例如大量文章中已把微波集成电路和毫米波集成电路并列相称，就是证明。微波的频率范围见表1所列。

表 1 无线电波段的划分

波 段 名 称		波长范围(m)	频 率 范 围
	超 长 波	大于10000	小于30kHz
	长 波	1000~10000	30~300kHz
	中 波	100~1000	300~3000kHz
	短 波	10~100	3~30MHz
	米 波	1~10	30~300MHz
微 波	分 米 波	0.1~1	300~3000MHz
	厘 米 波	0.01~0.1	3~30GHz
	毫 米 波	0.001~0.01	30~300GHz

表 2

常用微波波段划分及代号

波 段	下 标	波 长 (cm)	频 率 (GHz)	波 段	下 标	波 长 (cm)	频 率 (GHz)
P		133.2	0.225	S	C	15.0 12.5	2.000 2.400
		76.9	0.390		Q	12.5 11.5	2.400 2.600
L	P	76.9 64.5	0.390 0.465		Y	11.5 11.1	2.600 2.700
	C	64.5 58.8	0.465 0.510		G	11.1 10.3	2.700 2.900
	L	58.8 41.4	0.510 0.725		S	10.3 9.67	2.900 3.100
	Y	41.4 38.4	0.725 0.780		A	9.67 8.82	3.100 3.400
	T	38.4 33.3	0.780 0.900		W	8.82 8.10	3.400 3.700
	S	33.3 31.6	0.900 0.950		H	8.10 7.69	3.700 3.900
	X	31.6 26.1	0.950 1.150		Z	7.69 7.14	3.900 4.200
	K	26.1 22.2	1.150 1.350		D	7.14 5.77	4.200 5.200
	F	22.2 20.7	1.350 1.450	C	A	5.77 5.45	5.200 5.500
	Z	20.7 19.3	1.450 1.550		G	5.45 5.21	5.500 5.750
S	E	19.3 18.2	1.550 1.650		Y	5.21 4.84	5.750 6.200
	F	18.2 16.2	1.650 1.850	X	D	4.84 4.80	6.200 6.250
	T	16.2 15.0	1.850 2.000		B	4.80 4.35	6.250 6.900

续表

波 段	下 标	波 长 (cm)	频 率 (GHz)	波 段	下 标	波 长 (cm)	频 率 (GHz)
X	R	4.35 4.28	6.900 7.000	K	M	1.13 1.05	26.50 28.50
	C	4.28 3.53	7.000 8.500		N	1.05 0.977	28.50 30.70
	L	3.53 3.33	8.500 9.000		L	0.977 0.909	30.70 33.00
	S	3.33 3.12	9.000 9.600		A	0.909 0.833	33.00 36.00
	X	3.12 3.00	9.600 10.00	Q	A	0.833 0.789	36.00 38.00
	F	3.00 2.93	10.00 10.25		B	0.789 0.750	38.00 40.00
	K	2.93 2.75	10.25 10.90		C	0.750 0.714	40.00 42.00
K L	P	2.75 2.45	10.90 12.25		D	0.714 0.681	42.00 44.00
	S	2.45 2.26	12.25 13.25		E	0.681 0.652	44.00 46.00
	E	2.26 2.10	13.25 14.25	V	A	0.652 0.625	46.00 48.00
	C	2.10 1.95	14.25 15.35		B	0.625 0.600	48.00 50.00
	U	1.95 1.74	15.35 17.25		C	0.600 0.577	50.00 52.00
	T	1.74 1.46	17.25 20.50		D	0.577 0.555	52.00 54.00
	Q	1.46 1.22	20.50 24.50		E	0.555 0.535	54.00 56.00
	R	1.22 1.13	24.50 26.50				

注：见《微波传输线手册》1981年邮电版。

在工程实践中，国际上对微波频段多以代号称呼，见表2。

二、微波的特点

微波的特点反映了它的传输和传播特点，它与米波、短波、中波等的特点是有所不同的。

1. 在微波波段中，波长最长的为1m，最短的为1mm，如果用短波常见的传输线组成微波电路，由于它们的尺寸有可能接近于工作波长，线上的电压和电流不但与时间有关，而且与位置有关。另一方面，电路中的电阻、电感和电容等元件也逐渐失去了在低频电路时的明确含意。因为随着频率的升高， L 、 C 值很小就有足够大的电抗，如仍用低频电路中常用的电感器和电容器，它们本身及元件上引线 and 电路连线的分布电感、分布电容和分布损耗就会起决定性的作用。此外，在导体表面的集肤效应，在常见的平行双线传输线上出现的辐射效应，随着频率的提高，这些效应越来越显著，不利于微波的传输。

这说明低频电路理论的某些内容，已不再适用于微波电路；就要求我们寻求新的元件供微波电路使用。

2. 大多数物体的尺寸与微波波长比拟，甚至大得多。因此，微波对这些物体有很高的反射率。利用这一特点实现了无线电定位技术，制成雷达，探测空间物体的位置。

3. 微波（除毫米波外）可以穿过高空的电离层。利用这一特点实现卫星通信、导弹发射。短波不能通过电离层而是依靠反射进行传播的。

4. 在低频常用的平行双线传输线传输微波时，有辐

射损耗。因此，微波要用同轴线、波导、微带等作传输线。

5. 微波使用特殊结构的元件代替集中参数元件的电阻、电感和电容等。图4.13的匹配负载相当于低频电路的电阻；图5.3的微波谐振腔相当于低频的LC谐振电路；又如适当长度的开路线、短路线，可以做电感、电容。

三、微波问题的理论处理方法

因为微波有上述的特点，所以不能再用我们熟知的处理低频网络的电路理论来处理微波传输的问题了。微波的基本理论是经典的电磁场理论，是以麦克斯韦方程组为基础的电磁场理论。求解麦克斯韦方程，涉及到求解偏微分方程，一般而言，直接求解都相当复杂，往往要采用近似的数值解。然而，数值解仍然很繁琐，于是出现一种等效电路法，这种方法是将本质上属于电磁场的微波问题，在特定的条件下，当作一个线性网络，用线性网络理论解决，故称为等效电路法。这样，我们便可以应用熟悉的低频电路理论进行计算。这种化场为路的方法形成了“微波网络理论”，这种理论在微波技术中得到广泛的应用。当然，微波网络内涵的物理概念还必须从电磁场理论进行解释和分析。

微波技术的实际问题主要是微波元件的选择与微波测量。不论如何复杂的微波网络、系统都是由若干微波元件所组成；因此，了解微波元件的结构、工作原理和性能，对于解决各种实际问题是十分重要的。微波测量是有关微波技术的定量实验，是解决工程实际问题的重要手段。

在低频电路里，我们知道了电路元件和部件的基本参数，加入激励电压之后，便可以在电路的有关部分计算出确切的电