

WEI BO JI SHU JI CHU

马守全 编

微波技术基础

中国广播电视出版社

广播电视中等专业学校试用教材

微波技术基础

马守全 编

中国广播电视出版社

广播电视中等专业学校试用教材

微波技术基础

马守全 编

中国广播电视出版社出版
北京大兴沙窝店印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销

787×1092毫米 16开 31.75印张 792(千)字
1989年4月第1版 1989年4月第1次印刷

印数：1—8,000册 定价：10.20元

ISBN 7-5043-0016-0/TN·7

出版者的话

为了适应广播电视中等教育事业发展的需要，改变教材严重缺乏的局面，广播电影电视部教材编审委员会组织力量编写了一批中专工科教材，并由中国广播电视出版社出版，公开发行。这批计划出版的专业教材有：《广播声学》、《广播播控设备》、《有线广播技术》、《电视播控设备》、《彩色电视摄象机》、《录象设备》、《数字电视》、《微波技术基础》、《微波中继原理和设备》共计九种。在教材编写过程中，力求做到立论正确、概念清楚、理论联系实际。

这批教材暂作试用教材，适于招收初中毕业生、学制为四年的学校使用。鉴于目前各学校招生对象、学制、专业划分和课程设置不尽相同，各校可根据情况选用。设有相近专业的其他中等专业学校和职业高中也可选用本教材。

这批教材还可以作为干部培训的中级教材和职工自学的参考书，也可以供具有高中文化程度和一定无线电基础知识的读者阅读。我们殷切希望广大读者对本教材提出意见和建议，帮助我们做好教材出版工作。

前 言

本书是根据1985年4月广播电视中专教材大纲审定会议所通过的《微波技术基础》编写大纲编写的。

本教材的参考教学时数为120学时，主要讲述微波技术的基本理论和基本的分析方法。全书共分九章，主要介绍波导、同轴线、微带线等基本形式的微波传输线及其特性；微波网络、微波谐振腔、微波滤波器和微波元件的基本理论和应用；微波测量的基本方法；微波半导体器件和电真空器件的基本工作原理和应用。使用本教材时要求学生具有一定的电磁场和电磁波的基本理论。书中标有“*”号的章节可根据具体情况和教学时数取舍，略去这些内容并不影响全书内容和讲述的系统性和连贯性。为了适应中专教学的要求，在编写过程中尽量以阐明物理概念定性说明为主，少用数学分析。

北京广播学院微波工程系刘振国老师认真审阅了全部书稿，并提出了许多宝贵意见，在此表示诚挚的感谢。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1 9 8 7 年 11 月

目 录

绪 论	(1)
第一章 微波传输线的一般理论	
1.1 引 言	(5)
1.2 沿传输线传输的电磁波——导行波	(6)
* 一、麦克斯韦方程及其复数形式	(6)
二、波动方程	(8)
三、导行波的一般形式	(10)
1.3 导行波的分类及其物理意义	(12)
一、导行波的分类	(12)
(一) 横电磁波 (TEM 波)	(12)
(二) 横磁波 (TM 波)	(12)
(三) 横电波 (TE 波)	(12)
二、分类的物理意义	(12)
三、导行波的传输状态和截止状态	(14)
(一) 传输状态	(16)
(二) 截止状态	(16)
1.4 横电磁波 (TEM 波)	(17)
一、传输常数 γ 、相速 v_p 、群速 v_g 和波阻抗 η_{TEM}	(17)
二、TEM 波的场结构与频率无关	(19)
1.5 横磁波 (TM 波) 与横电波 (TE 波)	(19)
一、横磁波 (TM 波)	(19)
(一) 传输常数 γ 、相速 v_p 和群速 v_g	(19)
(二) TM 波的波长	(20)
(三) TM 波的场结构与频率有关	(20)
二、横电波 (TE 波)	(21)
(一) 传输常数 γ 、相速 v_p 和群速 v_g	(21)
(二) TE 波的波长	(22)
(三) TE 波的场结构与频率有关	(22)
1.6 部分波概念在研究传输线问题中的应用	(24)
1.7 长线理论及其图解法——圆图	(27)
一、长线理论	(28)
(一) 电报方程及其解	(28)
(二) 反射系数与输入阻抗 (导纳)	(31)

(三) 终端方程	(32)
(四) 传输线中的三种状态	(33)
(五) 驻波参量	(38)
二、圆图	(41)
(一) 等反射系数圆族 (或等驻波比圆族)	(41)
(二) 阻抗圆图——等电阻圆、等电抗圆	(43)
(三) 导纳圆图	(48)
(四) 实用圆图	(52)
本章小结	(59)
习题	(60)

第二章 金属波导

2.1 沿规则金属波导传输的导行波的一般特性	(63)
一、波型函数和传输因子	(63)
二、波导中传输的波型——模式的概念	(64)
三、不同模式的波具有不同的传输特性	(65)
2.2 矩形波导	(65)
一、矩形波导中的模式及其场分布	(65)
(一) TE波 (H波)	(66)
(二) TM波 (E波)	(67)
二、矩形波导的传输特性	(67)
(一) 传输常数 γ 和截止波长 λ_c	(68)
(二) 波的速度、波导波长、波阻抗	(71)
三、矩形波导中的主模——TE ₁₀ 波	(74)
(一) TE ₁₀ 波的传输参量	(74)
(二) TE ₁₀ 波的场结构	(75)
(三) TE ₁₀ 波的管壁电流分布	(77)
2.3 圆波导	(78)
一、圆波导中的模式及场分量	(78)
(一) TE波 (H波)	(79)
(二) TM波 (E波)	(82)
二、圆波导中电磁波的传输特性	(83)
三、圆波导中的三个主要模式及其应用	(85)
(一) TE ₁₁ 模式	(85)
(二) TE ₀₁ 模式	(86)
(三) TM ₀₁ 模式	(87)
2.4 同轴线	(88)
一、同轴线中传输的主模——TEM波	(89)
二、同轴线中的高次模——TE波和TM波	(90)
(一) TM模式的截止波长	(90)

(二) TE模式的截止波长	(91)
三、传输功率和损耗	(92)
(一) 功率容量	(92)
(二) 损耗	(93)
四、同轴线尺寸的选择	(93)
2.5 对规则波导的要求	(94)
一、抑制高次模式实现单模传输	(94)
二、功率容量	(94)
三、损耗与衰减	(96)
四、规则波导的尺寸选择	(99)
(一) 矩形波导	(99)
(二) 圆波导	(100)
五、矩形波导的工作频带	(100)
2.6 波导的激励与耦合	(101)
一、激励的一般原则	(101)
(一) 激励的基本要求	(101)
(二) 激励装置	(101)
(三) 奇偶禁戒规则	(102)
(四) 匹配	(102)
(五) 互易定理	(103)
二、波导的激励方法	(103)
(一) 电激励(探针激励)	(103)
(二) 磁激励(小环激励)	(104)
(三) 小孔或缝激励	(104)
(四) 直接连接——模式转换器	(104)
本章小结	(107)
习题	(107)

第三章 微带传输线

3.1 概述	(109)
3.2 带状线的主要特性	(110)
一、特性阻抗 Z_c	(111)
(一) 零厚度($t=0$)导体带情况下带状线的特性阻抗	(112)
(二) 科恩的特性阻抗 Z_c 的近似公式	(112)
二、传输速度与波导波长	(116)
三、带状线的损耗和衰减	(116)
(一) 介质衰减	(116)
(二) 导体衰减	(117)
四、功率容量	(118)
五、带状线的尺寸选择	(119)

3.3 微带的主要特性	(119)
一、微带中传输的电磁波的模式	(120)
(一) 微带中传输的主模——准 TEM 波	(120)
(二) 微带中的高次模	(120)
二、微带的分析方法——用准静态法求微带的特性阻抗 Z_c 和相速 V_p	(121)
三、微带的波导波长	(127)
四、微带的损耗与衰减	(127)
(一) 介质衰减	(128)
(二) 导体衰减	(128)
五、微带的色散特性和尺寸选择	(129)
(一) 色散特性	(129)
(二) 微带尺寸的选择	(129)
六、微带的激励	(130)
(一) 同轴 微带转换过渡装置 (转换接头)	(130)
(二) 波导 微带转换过渡装置 (转换接头)	(132)
3.4 耦合微带线	(132)
一、奇、偶模分析方法	(133)
二、奇、偶模参量	(135)
(一) 空气填充的耦合微带线的奇、偶模参量	(135)
(二) 部分介质填充耦合微带线的奇、偶模参量	(138)
本章小结	(143)
习题	(143)

第四章 微波网络

4.1 波导等效为长线和不均匀区等效为网络的原理	(147)
一、波导等效为长线的原理	(147)
(一) 功率关系与等效电压、等效电流	(148)
(二) 归一化阻抗与归一化电压、归一化电流	(149)
(三) 波导的等效阻抗	(151)
(四) 均匀传输线等效为长线的具体方法	(152)
* (五) 多模传输线的等效	(153)
二、不均匀区等效为网络的原理	(153)
(一) 网络的参考面	(153)
* (二) 唯一性定理和叠加原理	(154)
(三) 用网络参量来表征微波网络的特征	(157)
(四) 微波网络的分类	(158)
4.2 二端口微波网络的参量性质	(159)
一、各种网络参量的定义及其归一化	(159)
(一) 阻抗参量 (Z 参量)	(160)
(二) 导纳参量 (Y 参量)	(161)

(三) 转移参量 (A 参量)	(162)
(四) 散射参量 (S 参量)	(164)
(五) 传输参量 (T 参量)	(165)
二、网络参量的相互转换	(168)
三、常用基本电路单元的网络参量矩阵	(168)
四、参考面移动对网络参量的影响	(172)
4.3 二端口微波网络的组合	(173)
一、网络的级联	(174)
二、网络的并联—并联	(175)
三、网络的串联—串联	(175)
4.4 微波网络参量的测定	(176)
一、网络的工作特性参量	(176)
(一) 电压传输系数 T	(177)
(二) 插入衰减 L	(177)
(三) 插入相移 θ	(178)
(四) 插入驻波比 ρ	(178)
二、微波网络参量的实验测定方法	(179)
本章小结	(180)
习题	(181)

第五章 微波谐振腔

5.1 概述	(184)
5.2 微波谐振腔的基本特性和参量	(185)
一、微波谐振腔自由振荡的基本特性	(185)
二、微波谐振腔的基本参数	(188)
(一) 谐振频率 f_0 (或谐振波长 λ_0)	(188)
(二) 品质因数 Q_0	(189)
(三) 等效电导 G_0	(191)
5.3 矩形谐振腔	(192)
一、矩形谐振腔的振荡模式	(193)
(一) TE型 (或H型) 振荡模式	(193)
(二) TM型 (或E型) 振荡模式	(194)
二、矩形谐振腔的谐振波长 λ_0	(195)
三、矩形谐振腔中的最低振荡模式——TE ₁₀₁ 模式	(196)
5.4 圆柱形谐振腔	(197)
一、圆柱形谐振腔中的振荡模式	(193)
(一) TE型 (或H型) 振荡模式	(198)
(二) TM型 (或E型) 振荡模式	(198)
二、圆柱形谐振腔的谐振波长 λ_0	(199)
三、圆柱形谐振腔中几种常用的振荡模式	(200)

(一) TM_{010} 振荡模式	(200)
(二) TE_{011} 振荡模式	(201)
(三) TE_{111} 振荡模式	(203)
四、圆柱形谐振腔的模式图	(203)
5.5 同轴谐振腔	(205)
一、 $\lambda/2$ 型同轴谐振腔	(206)
二、 $\lambda/4$ 型同轴谐振腔	(206)
三、电容负载型同轴谐振腔	(207)
5.6 微波谐振腔的激励与耦合	(209)
一、谐振腔的耦合装置	(209)
二、谐振腔的耦合参数	(210)
(一) 有载品质因数 Q_L	(210)
(二) 耦合度和效率	(211)
本章小结	(213)
习题	(213)

第六章 微波元件

6.1 概述	(215)
6.2 电抗匹配连接元件	(216)
一、电抗匹配元件	(216)
(一) 膜片	(216)
(二) 谐振窗	(217)
(三) 销钉	(218)
(四) 螺钉匹配器	(219)
二、连接元件	(219)
(一) 接头、法兰	(219)
(二) 短路活塞	(221)
(三) 拐角、弯曲和扭转元件	(221)
6.3 阻抗变换元件及匹配	(222)
一、阻抗匹配	(222)
(一) 阻抗匹配的概念	(222)
(二) 波阻抗与等效阻抗	(225)
(三) 用电抗元件进行阻抗匹配	(225)
二、阻抗变换器	(239)
(一) 阶梯阻抗变换器	(239)
(二) 渐变式阻抗变换器 (渐变线)	(252)
6.4 衰减器和移相器	(254)
一、衰减器	(254)
(一) 吸收式衰减器	(254)
(二) 截止式衰减器	(255)

(三) 旋转极化式衰减器	(257)
二、移相器	(258)
6.5 定向耦合器	(259)
一、概述	(259)
(一) 定向耦合器的用途	(259)
(二) 定向耦合器的种类	(260)
(三) 定向耦合器的指标	(262)
二、波导型定向耦合器	(263)
(一) 波导单孔定向耦合器	(263)
(二) 波导十字孔定向耦合器	(265)
(三) 波导多孔定向耦合器	(268)
三、平行耦合线定向耦合器	(272)
(一) 平行耦合双线定向耦合器	(272)
(二) 耦合带状线定向耦合器	(273)
6.6 混合环	(277)
一、波导混合环	(278)
二、微带混合环	(279)
6.7 微波功率分配器	(280)
一、两路功率分配器	(280)
二、 N 路功率分配器	(282)
6.8 波导匹配双T (魔T)	(283)
一、T形接头	(283)
(一) ET接头	(284)
(二) HT接头	(285)
二、普通双T接头	(286)
三、匹配双T接头 (魔T)	(286)
四、匹配双T的应用	(287)
(一) 平衡混频器	(287)
(二) 微波阻抗测量电桥	(287)
6.9 微波铁氧体器件	(288)
一、铁氧体及其微波特性	(288)
(一) 旋磁效应	(289)
* (二) 张量磁导率 $\vec{\mu}$	(289)
* (三) 铁磁谐振	(289)
(四) 在圆极化波作用下的铁磁谐振	(290)
(五) 法拉第旋转效应 (极化面旋转效应)	(290)
(六) 场移效应	(291)
二、铁氧体隔离器	(292)
(一) 隔离器的技术指标	(292)

(二) 场移式隔离器	(293)
(三) 谐振式隔离器	(293)
三、铁氧体环行器	(294)
(一) 环行器的技术指标	(295)
(二) Y 形结环行器	(295)
四、微波铁氧体快控元件及 YIG 器件简介	(296)
本章小结	(297)
习题	(297)

第七章 微波滤波器

7.1 微波滤波器的基础知识	(299)
一、滤波器的一般知识	(299)
二、微波滤波器的主要技术指标	(301)
三、微波滤波器的综合设计	(302)
(一) 低通滤波器的三种典型衰减特性	(303)
(二) 低通原型滤波器	(305)
(三) 频率变换	(311)
(四) 滤波器电路的微波实现	(323)
7.2 微波低通滤波器	(323)
一、串联电感与并联电容的微波实现	(323)
(一) 用短路短线和开路短线实现	(323)
(二) 用高、低阻抗短线实现串联电感和并联电容	(325)
二、微波低通滤波器	(326)
三、倒置变换器、变形低通原型	(329)
(一) 倒置变换器	(329)
(二) 网络的对偶电路	(331)
(三) 变形低通原型	(333)
7.3 微波带通滤波器	(334)
一、一般原理	(334)
二、平行耦合线带通滤波器	(335)
(一) 含有阻抗倒置变换器的微波带通滤波器	(335)
(二) 含有导纳倒置变换器的微波带通滤波器	(338)
(三) 含有导纳倒置变换器的平行耦合线带通滤波器	(339)
(四) 串联电容间隙带状线带通滤波器	(340)
三、电感耦合波导带通滤波器	(341)
7.4 微波带阻滤波器	(341)
一、一般原理	(341)
二、微波带阻滤波器的梯形网络	(341)
(一) 含有阻抗倒置变换器的微波带阻滤波器	(341)
(二) 含有导纳倒置变换器的微波带阻滤波器	(343)

三、谐振电路的实现	(344)
四、微波带阻滤波器的实际结构	(347)
(一) 波导带阻滤波器	(347)
(二) 带状线带阻滤波器	(347)
本章小结	(348)
习题	(348)

第八章 微波电子器件

8.1 金属半导体结二极管及其应用	(351)
一、金属半导体结二极管的结构、工作原理和特性	(352)
(一) 结构	(352)
(二) 金属半导体结二极管的工作原理	(352)
(三) 金属半导体结二极管的伏安特性	(353)
(四) 金属半导体结二极管的等效电路及其参数	(353)
(五) 金属半导体结二极管的特点	(354)
二、金属半导体结二极管的应用	(354)
(一) 金属半导体结二极管的混频原理	(354)
(二) 采用一个二极管的单端混频器	(357)
(三) 采用两个二极管的平衡混频器	(358)
(四) 采用四个二极管的双平衡混频器	(360)
8.2 变容二极管及其应用	(361)
一、变容二极管的基本特性	(361)
(一) 变容二极管的静态特性及其等效电路	(361)
(二) 变容二极管的主要参数	(363)
(三) 变容二极管的动态特性	(365)
二、变容二极管的应用	(367)
(一) 非线性电容的变频效应	(367)
(二) 门雷—罗威关系式和参量放大器的分类	(367)
* (三) 非简并参量放大器的基本原理	(370)
* (四) 非简并参量放大器的结构	(371)
8.3 阶跃恢复二极管及其应用	(372)
一、阶跃管的基本特性和等效电路	(373)
(一) 阶跃管的基本特性	(373)
(二) 阶跃管的等效电路	(374)
二、阶跃二极管的应用	(374)
(一) 阶跃管倍频器的工作原理	(374)
(二) 阶跃管倍频器的结构	(376)
8.4 PIN二极管及其应用	(377)
一、PIN管的基本特性和等效电路	(377)
(一) 直流电压作用下的特性	(378)

(二) 交流电压作用下的特性	378
(三) 交直流电压同时作用下的特性	378
(四) PIN管的等效电路	379
(五) PIN管的主要参数	380
二、PIN二极管的应用	381
(一) PIN管开关	381
(二) PIN管电调衰减器	384
8.5 雪崩渡越时间二极管和转移电子器件	387
一、雪崩渡越时间二极管的基本特性及其等效电路	388
(一) 碰撞雪崩渡越时间二极管 (IMPATT) 的基本工作原理	388
(二) 碰撞雪崩渡越时间二极管的等效电路和电路参数	390
二、转移电子器件	391
(一) 基本工作原理	391
(二) 转移电子器件的电流—电压特性及其等效电路	394
(三) 振荡模式	394
三、雪崩渡越时间二极管及转移电子器件的应用 负阻振荡器	395
(一) 负阻振荡器的工作原理	395
(二) 负阻振荡器的基本电路	397
8.6 微波晶体管及其应用	398
一、微波双极晶体管的结构和等效电路	399
(一) 微波双极晶体管的结构	399
(二) 微波双极晶体管的等效电路	401
(三) 微波双极晶体的性能参数	401
二、微波场效应晶体管的结构、工作原理和等效电路	403
(一) 场效应和场效应晶体管	403
(二) 微波场效应晶体管的结构和工作原理	403
(三) 微波场效应晶体管的等效电路	405
(四) 微波场效应晶体的性能参数	405
三、微波晶体管的 S 参量	406
四、微波晶体管的应用	408
(一) 微波晶体管放大器	409
(二) 微波晶体管振荡器	411
8.7 微波电真空器件	412
一、静电控制电子管的发展及存在的问题	412
(一) 极间电容和引线电感的影响	413
(二) 电子渡越时间的影响	413
(三) 损耗增大	413
二、微波管工作的基础——电子流与电场的能量交换	414
(一) 电子流与直流电场的能量交换	414

(二) 电子流与交变电场的能量交换	415
三、速调管放大器和振荡器	415
(一) 双腔速调管放大器	416
(二) 多腔速调管放大器	420
(三) 反射速调管振荡器	424
四、行波管放大器	428
(一) 行波管放大器的结构	428
(二) 行波管放大器的工作原理	430
(三) 行波管放大器的工作特性	432
本章小结	435

第九章 微波测量

9.1 微波测量用信号源	437
一、微波测量用信号源的种类及用途	437
(一) 标准微波信号发生器	437
(二) 简易微波信号发生器	438
(三) 固态式微波信号发生器	438
(四) 点频微波信号发生器和扫频微波信号发生器	438
(五) 频率合成式微波信号发生器	438
二、简易微波信号发生器和标准微波信号发生器	440
(一) 微波电子管振荡器	440
(二) 固态微波振荡器	440
三、微波信号发生器的工作特性	441
(一) 频率特性	441
(二) 输出特性	442
(三) 调制特性	443
* 四、微波扫频信号发生器	443
(一) 扫频信号发生器的组成	443
(二) 返波管扫频信号发生器	444
(三) 固态扫频信号发生器	444
9.2 频率和波长的测量	445
* 一、频率标准	445
二、频率的测量方法	445
(一) 外差法	446
(二) 计数法	446
(三) 无源法	447
三、微波外差式频率计	447
四、微波计数式频率计	448
(一) 数字式微波频率计的一般工作原理	449
(二) 扩展测量频率上限的方法	451

五、微波谐振式频率计	(452)
(一) 微波谐振式频率计的结构	(452)
(二) 通过式接法与吸收式接法	(453)
(三) 影响谐振式频率计测量精度的因素	(454)
9.3 信号电平和功率的测量	(455)
* 一、信号电平的对数单位——分贝	(456)
(一) 信号电平	(456)
(二) 使用电平表示信号相对大小的优点	(456)
二、信号电平指示器	(457)
三、微波功率测量的基本方法	(458)
(一) 测热电阻法	(459)
(二) 热电偶法	(459)
(三) 量热法	(460)
四、热电偶式中、小功率计	(460)
(一) 微波功率探头	(460)
(二) 功率指示器	(461)
五、量热式大功率计	(461)
9.4 驻波测量	(462)
一、驻波测量的目的和基本原理	(462)
二、开槽测量线法	(463)
(一) 驻波测量线	(464)
(二) 开槽测量线的基本测量方法	(465)
三、反射计测量法	(467)
(一) 反射计	(467)
(二) 扫频反射计	(468)
9.5 阻抗的测量	(470)
一、开槽测量线法	(470)
二、电桥法	(470)
9.6 衰减的测量	(472)
一、衰减的定义和基本测量方法	(472)
* (一) 衰减与插入损耗的区别	(472)
(二) 衰减的基本测量方法	(473)
二、功率比法	(473)
三、替代法	(474)
(一) 高频替代法	(474)
(二) 中频替代法	(475)
(三) 低频替代法	(476)
9.7 品质因数的测量	(476)
一、功率传输法	(477)