

微波技术基础

上册

邮电中等专业学校试用教材

微波技术基础

上册

广东省邮电学校 编

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书根据邮电中等专业学校教学大纲编写，详细讨论了微波技术的基本原理。全书分上、下两册。上册内容有电磁场基本原理、低频线性网络、微波传输线、微波网络基础。每章末附有思考题和习题。

本书为中等专业学校微波专业教学用书。

微 波 技 术 基 础

上 册

广东省邮电学校 编

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街 27 号

北 京 印 刷 一 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 1980年10月第 一 版

印张：13²⁰/₃₂ 页数：218 1980年10月北京第一次印刷

字数：314 千字 插页：1 印数：1—10,000 册

统一书号：K15045·总2422-无6111

定价：1.10 元

前 言

本书是邮电中等专业学校教学用书。为适应新形势下邮电教育事业发展的需要，1978年，我们组织部分邮电学校分工编写了微波、载波、市内电话、线路、电报、电源、综合电信和邮政机械等八个专业所用的基础课和专业课的教学用书，并将陆续出版，以应各邮电中等专业学校教学急需。

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。由于编写、审定的时间仓促，又没有经过实践的检验，书中会有不少缺点和错误。希望有关教师和学生在使用过程中，把发现的问题提供给我们以便修改提高。

邮电部人事教育局
一九七八年十二月

目 录

绪论	1
第一章 电磁场基本原理	5
第一节 静电场	5
一、库仑定律	5
二、电场强度	9
三、高斯定理	15
*四、静电场中的导体和电介质	24
五、电位 电位差 电位差通量	29
六、电场力所作的功	32
七、电位 电位差 等位面	35
八、电场的能量	40
第二节 恒定电流的电场和磁场	42
一、电流密度	43
二、欧姆定律的微分形式	44
三、什么是磁场	45
四、磁感应强度	47
五、磁感应线 磁通连续性原理	51
六、毕奥——沙瓦定律	54
七、安培环路定律	57
八、磁场强度	62
九、磁场的能量	64
第三节 交变电磁场	66
一、位移电流和安培环路定律的推广	66
二、电磁感应定律	69

三、麦克斯韦方程组	73
四、边界条件	75
五、电磁波传播和辐射的基本概念	81
第二章 低频线性网络	106
第一节 概述	106
第二节 四端网络	107
一、四端网络的一般概念	107
二、四端网络的输入阻抗	111
三、四端网络的特性阻抗	112
四、四端网络的固有传输常数	116
五、中分定理	118
六、衰减器	120
第三节 二端网络	130
一、二端网络的一般概念	130
二、电抗二端网络的阻抗频率特性	131
三、电抗二端网络的等效和倒量	139
第四节 滤波器	143
一、滤波器的概念	143
二、梯型滤波器的传通条件	145
三、K 式滤波器	146
四、m 式滤波器	151
*五、mm' 式滤波器	160
六、复合滤波器	163
七、滤波器的并联运用	169
第五节 均衡器	180
一、衰减均衡器	180
二、相位均衡器	188
第三章 微波传输线	207
第一节 概述	207

第二节 平行双线和同轴线——TEM 波传输线	209
一、平行双线和同轴线是怎样传输电磁波的	209
二、均匀传输线方程及其解	215
三、无耗传输线	224
四、终端匹配时的无耗传输线	228
五、终端短路或开路时的无耗传输线	230
六、终端接任意负载时的无耗传输线	240
七、圆图及其应用	250
第三节 微带线——准 TEM 波传输线	267
一、什么是微带线？微带线的基本结构形式	267
二、微带传输线的特性	272
三、耦合微带线的特性	291
第四节 矩形波导和圆波导——非 TEM 波传输线	300
一、为什么要采用波导管来传输微波能量	300
二、在波导管内能传输 TEM 波吗	305
三、矩形波导	306
四、圆波导	333
五、波导的激励与耦合	343
* 第五节 若干其它类型的均匀波导	351
一、椭圆软波导	351
二、脊波导	352
三、开波导	353
附录一 关于 TE_{10} 波型的数学公式推导	369
附录二 同轴线中的高次波型	372
附录三 同轴射频电缆型号及主要电气参数	375
附录四 矩形波导主要参数表	376
第四章 微波网络基础	380
第一节 概述	380

第二节 微波网络的各种矩阵形式	384
一、阻抗矩阵	385
二、导纳矩阵	388
三、转移矩阵	388
四、散射矩阵	392
第三节 基本电路单元的矩阵参量	398
第四节 参考面的问题	406
第五节 双端口网络的工作损耗和插入损耗.....	408
一、工作损耗	408
二、插入损耗	410
第六节 对偶电路定理	412
附录 矩阵的基本运算规则	424

绪 论

微波技术已有几十年的发展历史。现在它已是一门比较成熟的学科。在雷达、通信、电子对抗、工农业及基础研究诸方面得到了广泛的应用。

什么叫微波？一般理解为波长从 1 米到 1 毫米（即频率从 300 兆赫到 300 吉赫）的电磁波。按波段划分，还可分为：分米波、厘米波和毫米波。

由此可见，微波的频率很高，波长很短，所以顾名思义称为微波(microwave)。

为了清晰起见，我们拿微波同工业用电(市电)和无线电广播的频率与波长作一比较。见表 0.1。

从表 0.1 可以看出，微波的波长比中波广播的波长短，比市电的波长更短。

表 0.1 微波波长与市电及中波广播波长的比较

	波 长	频 率
工业用电	$6 \times 10^8 \text{ m}$	50 Hz
无线电中波广播	560~187 m	535~1060 KHz
微 波	1 m~1 mm	300 MHz~300 GHz

为了对微波波段在整个电磁波谱中所占位置有一个全貌的了解，将整个电磁波谱的波段划分情况列于表 0.2。

根据实际应用的需要，现将国际上最近对微波频段重新划

表 0.2 电 磁 波 谱

波 段 名 称		波 长 范 围	频 率 范 围	频 段 名 称
工 业 波 段		10^5m 以上	3 KHz 以下	
无 线 电 波 段	超 长 波	$10^5\sim 10^4\text{m}$	3~30 KHz	甚低频 VLF
	长 波	$10^4\sim 10^3\text{m}$	30~300 KHz	低频 LF
	中 波	1000~200 m	300~1500 KHz	中频 MF
	中 短 波	200~50 m	1.5~6 MHz	中高频 IF
	短 波	50~10 m	6~30 MHz	高频 HF
	米 波	10~1 m	30~300 MHz	甚高频 VHF
	分米波	100~10 cm	300~3000MHz	特高频 UHF
	厘米波	10~1 cm	3~30 GHz	超高频 SHF
	毫米波	10~1 mm	30~300 GHz	极高频 EHF
	亚毫米波	1~0.75 mm	300~400 GHz	超极高频 SEHF
红 外 线		$0.75\text{mm}\sim 0.76\mu\text{m}$		
可 见 光		$0.76\sim 0.4\mu\text{m}$		
紫 外 线		$0.4\sim 0.1\mu\text{m}$		
X 射 线		$10^{-8}\sim 10^{-12}\text{m}$		
γ 射 线		10^{-9}m 以下		
宇 宙 射 线		10^{-16}m 以下		

分命名及新旧频段对照情况列于表 0.3。

为什么微波波段引起人们特别注意，这主要是因为微波波段与近代无线电技术中应用的其它波段比较而言，具有如下特点：

首先，微波的波长很短，一般来说其尺寸远小于地球上宏观物体（如飞机、船舰、火箭、建筑物等）的尺寸。这就使得微波波段的特点和几何光学很相似（称为似光特性）。利用微波的似光特性，就可以制成方向性很强的天线系统。例如使用微波波段的雷达，可不需要很大尺寸的天线系统，就能形成方向性极强的波束，使雷达的作用距离增加和定位精确。

表 0.3 微波频段划分

新 命 名 频 段	频 率 (GHz)	以 往 命 名 频 段
A	0.1	VHF
	0.2	
B	0.3	P
C	0.5	L
D	1.0	
E	2.0	
F	3.0	S
	4.0	
G		S 和 C
	6.0	C 和 X
H	8.0	X
I	10	
J	20	K
K	40	Q
L		V
	60	毫米波
M	100	

由于微波的波长很短，与低频无线电波比较，它还具有频带宽、携带信息量的潜力大和无阻碍地穿透高空电离层等特点。

其次，波导管、谐振腔和其它微波元件的尺寸与微波波长相近，处在同一个数量级上，这又使得微波的特点与声波相似。许多波导系统的东西可以在声学系统中找到相对应的器

件。例如波导管有如声学中的传声筒，号角天线有如喇叭，各式谐振腔有如不同的乐器。在这种情况下，一般的集中参数元件，如电感、电容和电阻等元件都必须用原理及结构上完全不同的波导元件来代替。

由于微波具有上述重要的特点，使微波的应用在近年来迅速发展成为一种新技术，在生产、国防和科学研究中得到越来越广泛的应用。目前微波技术正朝着高频段、微型化和开拓新的应用领域的发展方向发展。

由于微波波段的上述特点决定了对微波问题的分析方法与低频段有所区别。在低频领域里，除了在研究天线的辐射问题时用到“场”的概念和方法外。对其它问题的处理均采用“路”的概念和方法。而在微波领域里，情况就有所不同，如果不利用场的概念，就连最基本的微波元件都得不到解释。这是因为微波波长很短，以致元件内部各处的电场磁场是既与时间有关，又与空间有关的多元函数的缘故。因此场的概念和方法在微波技术中显得突出的重要。所谓“场”的概念和方法，就是应用麦克斯韦方程组结合边界条件去研究系统中电磁场随时间和空间的变化规律。严格来说，微波的问题主要是研究场的问题。但是这丝毫不意味着“路”的概念和方法不重要了，事实上本课程中涉及到的许多微波问题往往是从场的概念出发，最后归结为路的问题来加以处理。因此，在以后的分析中，场的方法和路的方法都将用到，两者互相结合，相互补充。

第一章 电磁场基本原理

本章的主要内容是研究有关静电场，恒定电流的电场和磁场以及交变电磁场的基本概念和基本规律。恒定场是不随时间变化的，它既是交变电磁场对时间变化率为零的特殊情况，又是交变场的基础；而交变电磁场则是恒定场的发展。

无线电波，它的实质就是交变的电场磁场互相依赖而存在，互相转化而运动的电磁波。要想分析电磁波就得掌握麦克斯韦方程组。因此麦克斯韦方程组是电磁场理论的核心，必须很好理解它的物理意义。

第一节 静 电 场

本节主要讨论静止电荷所产生的电场及其物理现象。从点电荷之间相互作用的库仑定律出发，引入静电场的两个基本物理量：电场强度和电位。在这个基础上讨论静电场的两个基本定理：高斯定理及静电场的能量守恒定理。

一、库 仑 定 律

从电工课程已经知道，用摩擦或其他方法可以使物体带电。把带电体所带的电叫做电荷，有时把小的带电体本身简称为电荷。实验指出，电荷有两种，一种叫正电荷，另一种叫负电荷。电荷既不能产生，也不能消灭，只能从一个物体转移到另一个物体上，这就是电荷守恒定律。

实验又指出,带电体之间具有相互的作用力,它与带电体间的距离、电荷的多少有关,也与带电体的大小、形状及电荷在带电体上的分布有关。但是当带电体本身的几何线度远比带电体间的距离小得多时,往往可以忽略带电体的形状与其上的电荷分布对作用力的影响,这时作用力仅与带电体间的距离及电荷的多少有关,针对这样的事实,可引入点电荷的概念:当带电体的大小和带电体间的距离相比很小时,把这种带电体看作是点电荷。必须指出,点电荷这一概念只有相对的意义,它本身不一定是很小的带电体。任何带电体都可以看作是点电荷的集合。

库仑定律就是描述两个点电荷之间的相互作用力的定律。它是从实验总结出来的。其内容是:两个点电荷 q_1 和 q_2 之间的相互作用力 F 与两电荷的电量 q_1 、 q_2 乘积成正比,与它们之间的距离 r 的平方成反比。作用力的方向沿着它们的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸。即

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

采用 MKSA 单位制,在真空中有

$$F = \frac{q_1 q_2}{4 \pi \epsilon_0 r^2} \quad (1.1)$$

式中 F 是力,单位是牛顿,简称为牛。

r 为两点电荷之间的距离,单位是米。

q_1 、 q_2 是电量,单位是库仑,简称为库。

ϵ_0 称为真空介电常数, $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36 \pi}$ 法/米 $\approx 8.85 \times 10^{-12}$ 法/米。

力是矢量,库仑定律(1.1)式可用矢量式来表示:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{F}_{12} &= -\frac{q_1 q_2}{4 \pi \epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_{12}^0 \\ \mathbf{F}_{21} &= -\frac{q_1 q_2}{4 \pi \epsilon_0 r^2} \mathbf{r}_{21}^0 \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

式中： $\mathbf{F}_{12}$ 表示电荷 q_1 对电荷 q_2 的作用力；

$\mathbf{F}_{21}$ 表示电荷 q_2 对电荷 q_1 的作用力；

$\mathbf{r}_{12}^0$ 表示自电荷 q_1 指向电荷 q_2 的单位矢量；

$\mathbf{r}_{21}^0$ 表示自电荷 q_2 指向电荷 q_1 的单位矢量。

从上式可知， $\mathbf{F}_{12}$ 和 $\mathbf{F}_{21}$ 的大小均等于 $\frac{q_1 q_2}{4 \pi \epsilon_0 r^2}$ ，在电荷 q_1 和 q_2 同号时， $\mathbf{F}_{12}$ 的方向和 $\mathbf{r}_{12}^0$ 相同， $\mathbf{F}_{21}$ 的方向和 $\mathbf{r}_{21}^0$ 相同，这时两者之间为斥力；在电荷 q_1 和 q_2 异号时， $\mathbf{F}_{12}$ 的方向和 $\mathbf{r}_{12}^0$ 相反， $\mathbf{F}_{21}$ 的方向和 $\mathbf{r}_{21}^0$ 相反，这时两者之间是引力。如图 1.1 所示。

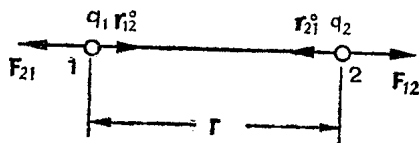


图 1.1 库仑力

例 1.1 有两个小球 A 和 B 各带正电荷，彼此相距 0.1 米，如图 1.2 所示。

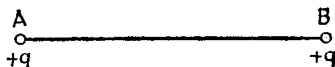


图 1.2 两点电荷连线上的场强

现在有第三个小球 C 带有电荷 $2q$ ，如(1) $2q$ 是负的，它应该放在什么地方，可以使小球 B 得到力的平衡？(2) 如果 $2q$ 是正的，这个小球 C 又应该放在哪里？

解：小球 B 受到 A 的斥力为 F_1 ：

$$F_1 = \frac{q^2}{4 \pi \epsilon_0 (0.1)^2}$$

(1) 当 C 上的 $2q$ 为负时，它应该放在 A 的左侧，它与 B 之间的距离为 x ， B 受到的吸力为 F_2 ：

$$F_2 = \frac{2q^2}{4\pi\epsilon_0 x^2}$$

要使 B 达到平衡, 则 F_1 应等于 F_2 , 即

$$\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0(0.1)^2} = \frac{2q^2}{4\pi\epsilon_0 x^2}$$

解之得: $x = 10\sqrt{2}$ (厘米)

(2) 当 C 上的 $2q$ 为正时, 它应该放在 B 的右侧, 距离为 x , B 受到 C 电荷的斥力为 F_3 :

$$F_3 = \frac{2q^2}{4\pi\epsilon_0 x^2}$$

应满足 $F_1 = F_3$, 才能使 B 达到平衡, 同样可解得 $x = 10\sqrt{2}$ (厘米)。

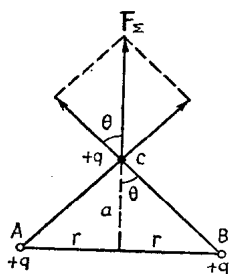


图 1.3 两点电荷垂线上的场强

例 1.2 如在 A 和 B 点各放正电荷 q , 它们相距为 $2r$, 如图 1.3 所示的 C 处, 又放一个正电荷 q , 试问受力的大小和方向。

解: 在 C 处的 $+q$ 将受到 A 和 B 处的正电荷 q 的斥力, 其大小均为:

$$F = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0(\sqrt{r^2 + a^2})^2}$$

它们的方向如图 1.3 所示, 合力就是矢量之和, 合力方向是在一只平行四边形的对角线上, 其 F_x 为:

$$\begin{aligned} F_x &= 2F \cos \theta = \frac{2q^2}{4\pi\epsilon_0(r^2 + a^2)} \cdot \frac{a}{\sqrt{r^2 + a^2}} \\ &= \frac{aq^2}{2\pi\epsilon_0(r^2 + a^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

二、电场强度

(一) 电场概念

由上述可知，电荷与电荷之间有相互作用力，但是两个电荷不接触，这种作用力是如何传递的呢？

我们知道，物体间的相互作用必须互相接触或借助于介乎其间的物质才能传递。没有物质，物体之间的相互作用就不可能发生。与此相似，电荷间的相互作用是通过一种特殊的媒介物——电场来作用的。每当电荷出现时，在它的周围就会激发起电场来，任何置于其中的电荷都将受到电场对它的作用力，而不是一个电荷超越一段距离 r 直接作用于另一个电荷的。因此，可以肯定地说，电荷周围有电场，这是客观存在，并且它的存在能为人们所觉察，所以说电场是一种物质。但是，电场毕竟不同于实物物质，实物的分子或原子所占的空间不能同时为另一分子或原子所占据，但是几个电荷产生的电场，却可以同时占据同一个空间，因此场和实物虽然都是物质，但它们又有区别，是物质存在的两种不同形式。

上面的讨论是假设电荷相对于观察者是静止的，所以该电荷产生的电场称为静电场。

实际上，运动着的电荷也是有电场的，例如电子管里的电子流，伴随着电流（即运动着的电荷）是有电场的。同样，随着时间而变化的电荷也是有电场的，而且是随时间而变化的，这就是交变电场。

总之，有电荷就有电场，电场是一种特殊的物质，电荷之间的作用力是通过它传递的。