

微波技术基础上



电 信 技 术 基 础 自 学 丛 书

DIANXIN JISHU JICHU ZIXUE CONGSHU

人 民 邮 电 出 版 社

73.459

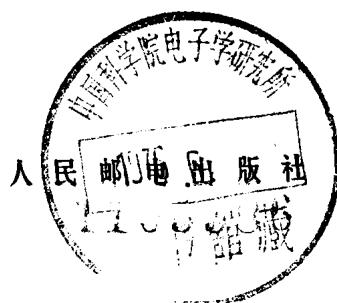
142

微波技术基础

(上册)

(电信技术基础自学丛书)

北京邮电学院微波专业编



出版说明

在毛主席无产阶级革命路线指引下，我国社会主义革命正在深入发展，社会主义建设事业蒸蒸日上。微波通信事业有了迅速发展，为了满足从事这一工作的维护、生产单位的工人、技术人员的要求，组织编写了本书。

本书分上下两册。内容包括电磁场简单原理、传输线原理、波导的基本概念以及各种常用的微波元件和部件的原理、分析和计算。

书中力求以物理概念进行叙述，避免过深的数学分析，并试图努力作到理论联系实际，结合微波设备中的主要元部件，作了比较详细的分析和提供一般设计方法。此外，结合书中基本内容附有若干例题和习题。

本书下册微波电子管部分，邮电五〇六厂参加了编写工作。



《电子学基础知识丛书》编委会

顾问: 杜连耀 毕德显 吴朔平 任 朗
顾德仁 张恩虬 陈芳允 秦治纯

主 编: 孟昭英

副主编: 吴鸿适 王守觉 李三立 凌肇元

编 委: 叶培大 童志鹏 陶 棣 甘本祓
何国伟 周炯槃 邱绪环 王玉珠
周锡龄 周明德 刘 诚 俞锡良
王明臣

秘 书: 刘学达

本书责任编辑: 毕德显

目 录

第一章 电磁场简单原理	(1)
§ 1 什么是电荷? 库伦定律	(2)
§ 2 什么是电场、电场强度	(8)
§ 3 什么是电位移? 高斯定律和应用	(15)
§ 4 什么是电位、电位差	(21)
§ 5 电场有没有能量? 能量密度	(26)
电场习题	(29)
§ 6 什么是磁场	(30)
§ 7 磁感应强度 B	(34)
§ 8 磁场对电流的作用力	(41)
§ 9 磁场强度 H	(46)
§ 10 磁场有没有能量	(51)
磁场习题	(52)
§ 11 交变电磁场的基本规律——电磁感应定律	(54)
§ 12 交变电磁场的基本规律——位移电流及安培环路定律的推广	(57)
§ 13 交变电磁场基本规律小结——马氏方程	(60)
§ 14 电磁波在自由空间是怎样传播的	(62)
交变电磁场习题	(67)
第二章 波导传输原理	(70)
§ 1 传输线是怎样传输电磁波的	(72)

§ 2	波导是怎样传输电磁波的·····	(79)
§ 3	电磁波在波导里传输有哪些主要特性·····	(92)
§ 4	波导的另一个主要特性——衰减·····	(103)
§ 5	圆波导·····	(111)
§ 6	同轴线 (同轴波导) ·····	(121)
§ 7	怎样在波导里激发起电磁波·····	(125)
	习题·····	(133)
附录一	关于 TE_{10} 波型的数学公式推导 ·····	(134)
附录二	微波波段划分表·····	(136)
附录三	同轴射频电缆型号及主要电气参数·····	(137)
附录四	矩形波导主要参数表·····	(138)
第三章	传输线里的反射、驻波和匹配 ·····	(143)
§ 1	传输线方程及方程的解·····	(144)
§ 2	传输线端接匹配负载有什么现象——行波·····	(150)
§ 3	传输线终端短路或开路将产生什么现象—— 反射和驻波·····	(154)
§ 4	传输线端接任意阻抗将产生什么现象——反 射、驻波和行波·····	(169)
§ 5	什么是阻抗圆图、怎样用法·····	(182)
§ 6	怎样匹配、怎样使用圆图·····	(190)
	习题·····	(198)
附录一	关于圆图的公式推导·····	(200)
附录二	一般传输线特性阻抗 Z_c 的公式 ·····	(203)
第四章	波导里电磁波的反射、驻波和匹配 ·····	(205)
§ 1	波导系统里的反射和驻波现象·····	(206)
§ 2	波导管的等效电压和等效电流·····	(214)
§ 3	波导的等效阻抗·····	(219)

§ 4 阶梯阻抗变换器——波导匹配举例·····	(227)
习题·····	(243)
附录一 切比雪夫阶梯阻抗变换器的设计·····	(245)
附录二 阻抗变换器用表设计法·····	(253)
第五章 基本波导元件 ·····	(266)
§ 1 衰减器、匹配负载——微波电阻·····	(266)
§ 2 膜片、销钉——微波电抗元件·····	(272)
§ 3 螺钉——微波可调电抗元件·····	(278)
§ 4 怎样用螺钉作匹配、二螺钉匹配器·····	(280)
§ 5 同轴、波导转换器——宽频带匹配器件举 例·····	(285)
习题·····	(293)
附录一 膜片和销钉的相对电纳计算公式·····	(294)
附录二 三螺钉、四螺钉匹配器·····	(297)
附录三 波导密封节——膜片匹配举例·····	(300)

第一章 电磁场简单原理

本书主要讲述微波技术或微波工程方面一些最基本的东西，包括波导管、波导元件、组件和微波电子管。

为了便于讲述，首先要学习电磁场原理。

这是因为微波技术的主要部分都与电磁波有关，例如波导管是一些截面是矩形的、圆形的，或者其它形状的空心金属管子（还有介质波导），它们里面传输的是电磁波。

波导元件，如波导销钉、螺钉、谐振腔等，在它们里面运动着的是电磁波。

微波波导组件，譬如说一只带通滤波器，它是一节节带有销钉或膜片的波导段联接起来的器件，它里面运动着的还是电磁波。

至于微波电子管譬如说行波管，它里面有什么在运动，这包括电子流和电磁波两样东西。

由此可见，要想理解、掌握这些基本的微波技术，我们必须懂得一些最必要的电磁场原理。

这里应该指出：用电磁场理论去解决一些结构复杂的问题还是很困难，有时甚至得不出简单明了的结果来。这时我们还得借用电路原理。对许多工程上的问题，应用电路原理要简单得多。这在第四章里还要讲到。

因此，在本书里，电磁场原理和电路原理两者将并用。

什么是电磁场？电磁场看不见摸不着吗？它是什么？这个

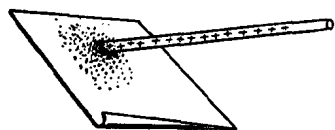
问题就是本章所要讲的问题。电磁场是一种特殊的物质，它具有特殊的运动形式，特殊的矛盾，特殊的规律性。

电磁场具有一系列物质的属性，它表现出力来（只有物质对物质才能表现出力来），它具有能量（物质是有能量的），它运动的速度等于或小于光速，它具有质量（物质是有质量的）等等，所以它不是什么虚无缥缈、空空洞洞，而是实实在在、客观存在的一种物质，与一般日常生活中所经常遇到的物质不同之处，仅仅是电磁场具有它自己的运动形式，自己的矛盾和自己的规律罢了。

本章将包括以下的内容：（1）静电场，（2）恒流磁场，（3）交变电磁场的基本规律，最后举一个实例——平面波作为结束。

§ 1. 什么是电荷？库伦定律

1.1 摩擦起电



图(1—1) 用丝绸摩擦过的玻璃棒吸引微小物体的情况

我们用丝绸擦玻璃棒，这个玻璃棒会吸引微小的物体，例如纸屑，羽毛和头发等，为什么？我们说丝绸和玻璃棒摩擦以后，丝绸和玻璃棒都带电了，都有电荷了，所以玻璃棒能够吸引微小的物体。

我们用毛皮擦火漆棒，这个火漆棒也能够吸引微小物体。

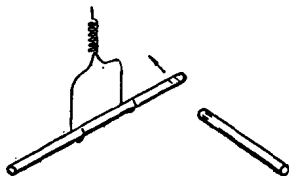
为什么？我们说毛皮和火漆棒都带电了，都有电荷了。

这些事实说明摩擦可以起电，可以产生电荷。

1.2 电荷有几种

但是玻璃棒上的电荷和火漆棒上的电荷，它们的性质是否一样的呢？电荷是不是只有一种呢？让我们做一些实验来观察一下。

我们把一个用毛皮摩擦过的火漆棒靠近另一个也是用毛皮摩擦过的火漆棒，发现两者之间有互相排斥的力量，如图(1—2)所示。



图(1—2) 同性相斥

可是我们把一个用丝绸摩擦过的玻璃棒靠近那个火漆棒，却发现彼此之间，不是互相排斥，而是互相吸引。

不但如此，而且不论那一种带电物体靠近那个火漆棒，不外乎发生两种情况，一种情况是互相排斥，另一种是互相吸引。

这些事实说明：

(1)不是所有电荷的性质都是一个样的，电荷不是只有一种，而是有两种。

一种是和玻璃棒所带的电荷的性质一样的，这一种电荷规定为正电荷。

另一种是和火漆棒所带的电荷的性质一样的，这一种电荷为负电荷。

自然界存在这么两种不同性质的电荷，正电荷或称阳电荷，负电荷或称阴电荷。

(2)两种同性的电荷互相排斥，两种异性的电荷互相吸引，这叫做同性相斥，异性相吸。

讲到这里可能会发生一些问题了。譬如说摩擦怎么会起电

呢？又譬如说同性相斥，异性相吸，这个斥力或吸力有多大呢？让我们一个个来讲一下。

1.3 摩擦怎么会起电的

丝绸和玻璃棒相摩擦，毛皮和火漆棒相摩擦，丝绸、玻璃、毛皮和火漆棒上为什么会带上了电呢？

原来物质是由原子所组成的，原子里面有一个原子核，它带着正电荷，离原子核很远的地方有电子，它们既自转，又围绕原子核沿一定的轨道作公转，电子带着负电荷。

不同元素的原子的电子数不同，最简单的氢原子只有一个电子，铀原子就有92个电子。但是不管有多少电子，原子核所带的正电荷的电量总是等于电子所带的负电荷的总和。

一个电子所带的电荷为 1.602×10^{-19} 库。

两个物体在摩擦以前，它们的原子核的正负电荷的数量是相等的，不呈显出带电的现象，当两者互相摩擦时，一个物体失掉了一些电子，而带上了正电，另一个物体则得到了电子，而带上了负电。譬如说丝绸和玻璃棒摩擦，玻璃棒失掉了一些电子，于是它就带上了正电荷，丝绸得到了一些电子，于是它带上了负电荷。毛皮和火漆棒相摩擦，则毛皮丢失了电子，而火漆棒得到了电子，所以毛皮带正电荷，火漆棒带负电荷。

这就是摩擦为什么会起电的原因。

1.4 电荷之间有多大的力——库伦定律

我们已经知道两个电荷之间有相互作用的力，这个力有多大？力的方向是怎样的？根据大量的实验，得出了如下的结果：

(1) 力的大小与两个电荷量的乘积成正比，两者的乘积愈

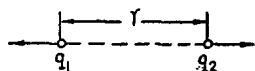
大，相互作用的力愈大。

力的大小也与它们之间的距离的平方成反比，两个电荷之间的距离愈大，力愈小。反之则愈大。

每个电荷所受到的力的数量是相等的。

(2) 每个电荷所受到的力是在连接两个电荷的一条线上，而方向相反，如图(1—3)所示。

图(1—3)中所示的力的方向是两个同性电荷互相作用的力的方向。这是互相排斥的力，如果两个电荷一正一负，那末两个箭头应该反过来，成为互相吸引的力量。



图(1—3)

把上述情况写成公式，为：

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi r^2 \epsilon} \quad (1-1)$$

q_1 和 q_2 为两个点电荷的带电量，单位用库伦(或简称库)。如两者都是正或都是负，则 F 是正的，代表斥力。如一正一负，则 F 是负的，代表吸力。

r 为两者之间的距离，单位用米。

ϵ 为介电系数，真空的介电系数 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ 法拉/米。

其它介质的介电系数 ϵ 与真空的 ϵ_0 之比为 ϵ_r ，称为相对介电系数，某些物质的 ϵ_r 见表(1—1)。

F 是力，单位用牛顿。

1.5 计算举例

例(1)：已知 q_1 为 1.6×10^{-6} 库伦， q_2 为 2×10^{-9} 库伦，两者相距 $r = 0.1$ 米，求相互作用的力等于多少？

应用公式(1—1)，得：

$$F = \frac{1.6 \times 2 \times 10^{-6} \times 10^{-9}}{4\pi(0.1)^2 8.854 \times 10^{-12}} = 3 \times 10^{-3} \quad \text{牛顿}$$

表(1-1) 电介质相对介电系数和损耗角正切

电 介 质	相对介电系数(ϵ_r)	损耗角正切($\tan\delta$)
真 空	1	
空 气	1.000585	
石 英	3.8	0.10×10^{-3}
皂 石	6.25	0.55×10^{-3}
云 母	5.4	0.3×10^{-3}
水	77	1.15
聚 乙 烯	2.26	0.31×10^{-3}
聚苯乙烯	2.4—2.65	0.33×10^{-3}
氟 塑 料	2.1	0.15×10^{-3}
聚四氟乙烯纤维玻璃	2.5	10^{-3}
氧 化 铍	6.1	10^{-4}
氧 化 铝	9.8	10^{-4}
镁钛酸盐	24	7×10^{-4}
四钛酸钡	37.8	6×10^{-4}
镁硅酸盐	4.5—5	10^{-3}
金 红 石	100	4×10^{-4}
铁 氧 体(钇石榴石)	13—16	2×10^{-4}
高纯二氧化钛瓷	100	$1-2 \times 10^{-4}$
钛 搪 80 瓷	70—80	$4-5 \times 10^{-4}$
钛酸铯单晶	~ 300	$1-2 \times 10^{-4}$
钛酸铯瓷	~ 296	3×10^{-4}
砷化镓(GaAs)	13.2	
硅 (Si)	11.8	
锗 (Ge)	16	
硫化铅(Pbs)	161	
硒化铅(PbSe)	280	
碲化铅(PbTe)	360	

例(2): 有两个小球 A 和 B 各带正电荷 q , 彼此相距 0.1 米如图 (1-4a) 所示。

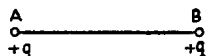


图 (1-4a)

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

解: 小球 B 受到 A 的斥力 F_1 为:

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

(a) 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 F_2 为:

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

要使 B 达到平衡, 则 F_1 应等于 F_2 , 即:

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

$$\therefore x = 10\sqrt{2} \text{ (厘米)}$$

(b) 当 C 上的 $2q$ 为正时, 它应该放在 B 的右侧, 距离为 x , B 受到的斥力 F_3 为 $\frac{2q^2}{4\pi\epsilon_0 x^2}$, 它应与 F_1 相等, 才能使 B 达到平衡, 于是

$$F_1 = F_3$$

$$x = 10\sqrt{2} \text{ (厘米)}$$

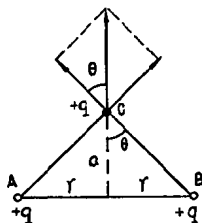


图 (1-4b)

例(3): 如在 A 和 B 点各放正电荷 q , 它们相距为 $2r$, 现在如图 (1-4b) 所示的 C 处, 又放一个正电荷 q , 试问它受到多大的一个力。

解: 在 C 处的 $+q$ 将受到 A 和 B 处的正电荷 q 的斥力, 它

们的数量均为：

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

它们的方向如图(1-4b)上所示，它们的合力就是它们的矢量和，矢量和的方向已绘在图上，是在一只平行四边形的对角线上，它的大小，我们知道 $F_{\text{总}}$ 为：

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

现在如果放在 A 处的 q 是负的，大家来算一下 C 处的 $+q$ 受到多大的一个力？方向如何？

§ 2. 什么是电场、电场强度

2.1 电场概念

讲到这里可能要问两个电荷彼此怎么会受到力的？

我们推车子，我们的手把力送给车子，我们和车子都是物体，力只有通过物体才能送给另一物体。

我们走路，我们的脚给地面以力，这个力也是从物体送给物体的。

以上两例中的力都是一种物质直接送给另一种物质的，两种物质是直接接触的。

现在两个电荷，彼此是不直接接触的，那么两个电荷所受到的力是怎样送给它们的呢？

有电荷就有电场，电场是一种特殊的物质，一个电荷有它

的电场，这个电场给另一个电荷以力，另一个电荷也有它的电场，这个电场给前述的那个电荷以力。

能给电荷以力的地方，存在着电场（这里所讲的电荷是相对于地球而言是静止的电荷）。

力只有通过物质才能彼此作用，所以电场是一种物质。

假使空间只有两个电荷，那末总的电场就是两者所产生的和。

总起来，电荷和电场是同一存在的两个方面，只要有电荷，它的周围就有电场，它们是永远不可分割的整体。

上面的讨论是假设电荷相对于地球是静止的，相对静止的电荷产生的不随时间变化的电场为静电场。

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。

实际上，随着时间而变化的电荷也是有电场的，这个电场也将随时间而变化，是一个交变的电场，这将在本章的后几节里讨论。

总之，有电荷就有电场，两者形影不离，电荷的周围存在着电场。

2.2 什么是电场强度

一般的物体有它的属性，例如质量、尺寸、颜色、形状等等，我们用这些去表示出某一个物体，应用这些把一个物体区别于另一个物体。

电场有什么主要的属性呢？亦即电场的基本物理量是什么？我们用什么去表示出某一个电场？应用什么把一个电场区别于另一个电场？

电场主要、明显、直接的一个属性是电场强度 E ，它是电

场的基本物理量，那末，什么是电场强度 E 呢？

电场强度定义为一个单位正电荷在电场里各点受到的力，它有大小，有方向，是一个矢量，它的大小可用下式(1—2)表示。

$$E = \frac{F}{q} \quad (1-2)$$

式中 F 是 $+q$ 所受到的力，用牛顿表示（1牛顿 $=10^5$ 达因）， q 代表正电荷数量，用库伦代表（1库伦 $=6.25 \times 10^{18}$ 个电子所带的电荷量），电场强度 E 用伏特/米表示。

电场强度的方向是正电荷 q 在电场里受力的方向。

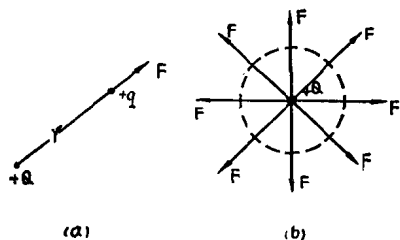
应用电场强度 E 就可以把电场里每一点的强弱和方向表示出来了。

2.3 电场强度计算举例

例(1)：真空中放一个点电荷 Q ，求它的电场里各点的电场强度 E 等于什么？

解：电场与电荷两者是不可脱离的一个整体，有怎样的电荷就有怎样的电场。不同的电荷具有不同性质的场。

现在有一个点电荷 $+Q$ ，它的电场是怎样的呢？这可以用一个很小的正的检验电荷 $+q$ 放到电场去测量它受到的力。应用小的电荷去测量，目的在于因为小，不至于改变 $+Q$ 所产生的电场而能够得到准确的结果。



图(1—5) 点电荷 $+Q$ 的电场

$+q$ 放到离 $+Q$ 为 r