

# 微波原理

鲍家善编

高等教育出版社

818502/25

## 序 言

微波原理是无线电物理专业的一门基础课程。本书是根据作者于1957—1962年为南京大学无线电电子学专业开设该课程时所编写的讲义，选取一部分主要内容修订而成。为了适合综合大学的特点（在学过电动力学及数学物理方法等课程的基础上学习本课程），所选内容偏重于经典电磁理论在微波技术中的应用。原来计划编写的内容为：传输线理论，电磁场理论，波导理论，慢波系统，空腔谐振器的基本理论，微波传输的某些问题，发射系统电动力学及天线理论等章节。后来考虑到大多数学生毕业后的实际需要，加上教学计划所规定的学时数有限，所以在讲课中完全删去了慢波系统一章，微波传输等后面三章的内容也作了很大的删改，只作了一些定性的介绍，而没有从电磁理论的观点出发予以阐述。此外，目前已有不少很好的中文书籍都是按类似的方式讨论这些内容的（例如列别捷夫著“超高频技术”，陆钟祚著“超高频技术”，薄瓦著“超高频天线”等）。因此，有关慢波系统、波导器件和天线等的内容就没有列入本书之内。在内容方面经过这些改动之后，就形成了本书现在的格局。

根据编者几年来的教学经验，讲授本书的内容时可以如下分配学时：

|            |    |    |
|------------|----|----|
| 绪论         | 2  | 学时 |
| 传输线理论      | 10 | 学时 |
| 电磁场理论      | 10 | 学时 |
| 波导理论       | 20 | 学时 |
| 空腔谐振器的基本理论 | 6  | 学时 |

但教材内容较多,在讲授时,可根据专业的要求加以删减。例如4.14和4.15两节,可作定性介绍,4.16,4.17,5.8,5.9和5.10等节对初学微波理论的同学可以删去不讲。

在本书定稿后,蒙华东师范大学陈涵奎同志作了仔细的审阅,并提出了许多宝贵的意见;南京大学无线电教研室吴培亨同志仔细阅读了本书的部分内容,对修改绪论、传输线理论、空腔谐振器的基本理论等章节提出了许多有益的建议;张善杰同志对绪论一章提出了增删的意见;作者对他们的帮助,致以衷心的感谢。

自从1962年以来,作者就没有再担任这门课程的教学工作,稿件付印前,也没有作很大的修改,缺点一定很多,希望读者多提意见,以便今后改进。

鲍家善

1965年7月

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第一章 绪论                  | 1  |
| § 1.1 “场”和“路”的概念        | 1  |
| § 1.2 微波的应用             | 4  |
| § 1.3 微波技术的发展           | 8  |
| 参考书刊                    | 9  |
| 第二章 传输线理论               | 10 |
| § 2.1 引言                | 10 |
| § 2.2 传输线的基本方程          | 12 |
| § 2.3 传输线方程的解           | 14 |
| § 2.4 传播常数              | 15 |
| § 2.5 特性阻抗              | 18 |
| § 2.6 反射系数              | 19 |
| § 2.7 阻抗变换              | 22 |
| § 2.8 传输线的输入阻抗          | 24 |
| § 2.9 莱歇尔线              | 28 |
| § 2.10 驻波比              | 30 |
| § 2.11 传输线的圆图           | 33 |
| § 2.12 阻抗圆图应用的例子        | 38 |
| 本章小结                    | 41 |
| 习题                      | 44 |
| 参考书刊                    | 48 |
| 第三章 电磁场理论               | 50 |
| § 3.1 电磁场的基本方程式         | 50 |
| § 3.2 在无限的均匀同向介质中传播的电磁波 | 56 |
| § 3.3 波阻抗               | 65 |
| § 3.4 电磁波的反射和折射         | 70 |
| § 3.5 斜阻抗               | 71 |
| § 3.6 夫累涅尔公式            | 73 |
| § 3.7 复乌莫夫-坡印亭矢量        | 75 |
| § 3.8 电磁波的偏振            | 78 |
| § 3.9 非理想导体和非理想介质中的电磁波  | 81 |
| 本章小结                    | 88 |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 习题                                | 94         |
| 参考书刊                              | 97         |
| <b>第四章 波导理论</b>                   | <b>99</b>  |
| § 4.1 引言                          | 100        |
| § 4.2 在任意截面的金属管内传播的电磁波            | 102        |
| § 4.3 截止频率                        | 106        |
| § 4.4 矩形波导                        | 109        |
| § 4.5 在矩形波导中传播的主型波的性质             | 116        |
| § 4.6 圆柱形波导                       | 126        |
| § 4.7 在圆柱形波导中传播的主型波的性质            | 132        |
| § 4.8 $TE_{01}$ 和 $TM_{01}$ 型波的特性 | 135        |
| § 4.9 同轴线                         | 140        |
| § 4.10 波导的输入阻抗                    | 146        |
| § 4.11 波导的非均匀性                    | 148        |
| § 4.12 波导中阻碍物的等效电路                | 149        |
| § 4.13 波导的激发和不同波型的变换              | 151        |
| § 4.14 具有凹形截面的波导                  | 156        |
| § 4.15 非封闭式波导                     | 158        |
| § 4.16 波导中波型的正交性质                 | 173        |
| § 4.17 用正交波型来表示波导中的电磁场            | 177        |
| 本章小结                              | 178        |
| 习题                                | 189        |
| 参考书刊                              | 194        |
| <b>第五章 空腔谐振器的基本理论</b>             | <b>195</b> |
| § 5.1 引言                          | 195        |
| § 5.2 矩形空腔谐振器                     | 198        |
| § 5.3 圆柱形空腔谐振器                    | 206        |
| § 5.4 空腔谐振器的等效电路                  | 211        |
| § 5.5 空腔谐振器的微扰                    | 216        |
| § 5.6 重入式空腔谐振器                    | 220        |
| § 5.7 空腔谐振器的外接负载和耦合系数             | 223        |
| § 5.8 空腔谐振器的基本理论                  | 226        |
| § 5.9 空腔谐振器的固有振荡                  | 232        |
| § 5.10 空腔谐振器的受迫振荡                 | 237        |
| 本章小结                              | 244        |
| 习题                                | 253        |
| 参考书刊                              | 256        |

# 第一章 緒論

## 重點要求

- (1)了解提高传输信号的频率对集总参量电路和分布参量电路的影响;
- (2)了解微波的主要应用。

### § 1.1 “场”和“路”的概念

近年来,在无线电通讯中不断使用波长越来越短的电磁波,所采用的电磁波由长波、中波、短波、超短波、微波、超微波,直到光波。微波是指波长在1米到1毫米的电磁波。根据波长,还可以把微波再划分为分米波、厘米波和毫米波。波长小于1毫米到百分之几毫米(红外线)的电磁波,则称为超微波,或亚毫米波。超微波是否属于微波范围,尚有待于进一步研讨。

在低频率下,电系统的实际尺寸远远小于波长。因此,稳定状态的电压和电流的效应,可以认为是在整个系统各处同时建立起来的。系统的各种不同元件,可以用一定的参量来表征(例如,  $L$  或  $C$ ),这些参量既不依赖于时间,亦不依赖于空间。这就是把元件视为“集总”参量的电路分析观点;熟知的基尔霍夫定律能圆满地解决实际问题,无须深究系统中复杂的电磁场结构。但是,微波的波长很短,比地球上一般物体的几何尺寸要小得多。任何实际系统的线性大小都不可能远小于微波的波长。因此,微波的产生、传输、放大、辐射等问题都异于低频技术。例如,用同轴电缆、空心金属导管、介质杆等来作传输线,在这些系统中,元件的电性质不能认为是集总的,普通的电容和电感的概念不复适用,甚至“电压”、“电流”等概念亦将失去其确切的意义。这时,我们应该用更普遍

的所谓“场”的观点，由麦克斯韦场方程组，并结合适当的边界条件，来研究系统内电磁场的结构；用功率、频率、阻抗等作为微波测量的基本量。在长波极限下，可由麦克斯韦场方程组导出基尔霍夫定律。

在频率从 50 到 100 兆赫以上的波段，集总参量电路的概念不再真实。这时，我们必须认为在传输线上每单位线长都具有一定大小的参量，这种电路称为分布参量电路。分布参量电路一直可以应用到 3000 兆赫，相当于 10 厘米的波长。空心的导管——波导可以用来传输波长短于 10 厘米的电磁波。一定形状和一定大小的波导，可以传输高于某一临界频率的电磁波。在微波波段内，波导的大小可以和实验室所用的仪器尺寸相比拟。因此，既不过大，也不太小，用它来传输电磁波的能量是最适当的。在毫米波段内，波长更短，除了采用尺寸高度精确的波导外，还常常利用光学方法传输电磁能量。

了解关于分布参量电路的所谓传输线理论，还是有助于研究波导的。我们把真实的传输线理想化，认为每单位长度的传输线具有一定大小的电容、电感、电阻和电导。这种研究方法是非常强有力的。必须指出，在长波时，只有一种类型的波存在。但是，在微波波段内，可能有几种类型的波同时出现。这时，只有利用麦氏场方程组，才能对波导问题作全面的了解。尽管如此，波导中每一类型的波都具有一定的传播常数。因此，波导对某一种波型来讲，还是可以认为与一根普通传输线相类似。利用传输线理论，可以更容易了解电磁波在波导中的传播性质。在传输线理论中，阻抗是一个重要的物理量。我们将把阻抗的概念推广到波导，这有助于理解其中场的性质。

在高频时，不能采用含有电感和电容的回路的原因是由于它的损耗过大。定量分析这些损耗已超出了本书的范围。但是，定性地确定这些损耗，

可以说明集总参量电路所受到的自然限制。

在高频时，线圈和电容器作为电路元件所产生的损耗可分为三种形式：辐射、传导和介质损耗。当集总参量电路的尺寸接近于电磁波波长时，辐射损耗将产生显著的影响。当仪器的大小和波长相比拟时，有许多新的困难发生。这时，电路的参量将随导线电感、杂散电容、辐射阻尼等因素而变更。此外，整个迴路将和附近的物体发生耦合。一个大的电感线圈将变成一个迴形天线。显然，要想减小辐射损耗就必须减小仪器的尺寸。但是，这种按照一定比例而减小仪器尺寸的方法将受到其它损耗的阻挠。

介质的损耗角是和它的分子结构有关的。此外，对于某些物质，除了随频率而增加的损耗外，在微波波段内，还可能发生共振吸收现象。在高频时，传导损耗的产生是由于导体的趋肤效应，即电流集中在导体的表面。趋肤厚度随频率的增加而递减。因此，要想使导体的电阻不变，必须增加导体的表面面积，亦即导体的横截面。同时，当趋肤厚度很小时，导体表面的光洁度亦是一个重要的因素。

综合上述，各物理量和频率的关系如下所示：

辐射损耗  $\sim f^2, f^4$ ;

介质损耗  $\sim f$  ;

传导损耗  $\sim f^{\frac{1}{2}}$  ;

趋肤厚度  $\sim f^{-\frac{1}{2}}$  。

按照一定比例缩减仪器尺寸，则随频率而增加的损耗，在原则上是可以完全消除的。一般电路的参量和场的参量的适当比例乘子列在表 1.1 内。例如，当一个给定的电路运用在频率  $f'$  ( $f' = nf$ ) 时，欲使其损耗不变，电路的参量必须按照表 1.1 所示的比例乘子修正。

当频率高于某一极限值时，采用改变集总参量电路的参量的方法来减小损耗，效果不够良好。因此，必须代以分布参量的电路。例如，当频率提高时，我们必须把电导率增加到  $\sigma'$  ( $\sigma' = n\sigma$ )。要想使损耗不变，必须增大导体和介质的线性大小。这自然和其他参量的比例缩减原则相违反。

由集总参量电路过渡到双线传输线是第一个过渡。双线传输线是介于集总参量电路和波导之间的电路。双线传输线是两根彼此绝缘的导线，它的参量集总在横截面上并沿着导线的轴线分布。因此，这类导线的长度和电磁波波长相比拟，但其横截面的尺寸远小于波长。从上述的线性大小，可以定出双线传输线的使用频带。低限频率决定导体的大小。在实际应用中，频率

表 1.1 当频率增高时, 集总参量电路的物理量的比例乘子

| 物 理 量  | 原 有 大 小   | 修 正 大 小                |
|--------|-----------|------------------------|
| 长度     | $l$       | $l' = l/n$             |
| 频率     | $f$       | $f' = nf$              |
| 波长     | $\lambda$ | $\lambda' = \lambda/n$ |
| 电感     | $L$       | $L' = L/n$             |
| 电容     | $C$       | $C' = C/n$             |
| 电导率    | $\sigma$  | $\sigma' = n\sigma$    |
| 传播常数   | $\gamma$  | $\gamma' = n\gamma$    |
| 天线有效面积 | $S$       | $S' = S/n^2$           |
| 不变的物理量 |           |                        |
| 电介常数   | $k_e$     |                        |
| 磁介常数   | $\mu_m$   |                        |
| 相速     | $v_p$     |                        |
| 阻抗     | $Z$       |                        |
| 天线增益   | $G$       |                        |

的低限约为 50 兆赫, 相当于 6 米的波长。和集总参量电路所受到的限制一样, 频率的高限受到损耗的限制。当波长很短时(在微波波段内), 细导线具有很高的欧姆损耗。

在双线传输线接近频率高限时, 用同轴线或波导来传递电磁能量是有好处的。在一根空心金属导管内, 其横截面的线性大小和波长相比拟。波导具有较高的传输效率, 结构简单, 使它能普遍地应用于微波电路中。当波长大于数厘米时, 波导的横截面亦较大, 因此, 比较笨重。 $\lambda=10$  厘米可以认为是使用同轴线和波导的边界值。由于缺乏最短无线电波的发生器, 波导使用频率的高限, 目前还不能十分肯定。但是, 为了获得一定的传输效率和功率, 在毫米波段内, 波导中所传播的波通常是高次型波。这样, 可以避免使用不切实际的细波导管。传递高次型波的方法, 在某些方面, 和光学方法相似。

## § 1.2 微波的应用

最近十多年来, 微波传输设备和微波电子设备, 在技术上已经发展到相当成熟的阶段。这些设备不仅在实验室内试用, 而且在国防上和国民经济上有着极重要和极可靠的应用。其中以雷达,

通讯和导航等为最主要。

雷达是在第二次世界大战期间发展起来的一门新技术，并取得很大的成就。战后，雷达的发展更为迅速，应用也更加广泛。

雷达的工作频率都在1000兆赫以上，一般在3,000到10,000兆赫之间。频率愈高，设备和天线愈轻巧，因而愈适合于移动的装置。雷达使用脉冲的发射和反射。微波振荡器在发射脉冲波时，输出功率的峰值很高。若用灵敏的接收机，则探测距离很远。早期的米波雷达只被用作侦察敌情，搜索敌机与敌舰。有了微波雷达以后，才能发现较小的目标，例如战场上的坦克。继而，由于洲际导弹，人造卫星和宇宙飞船的实际需要，雷达又有了新的发展，出现了高分辨率雷达。现代雷达不仅能够确定出快速飞行体的坐标，而且还能够控制导弹和炮火，跟踪卫星，侦察洲际导弹和宇宙火箭，测定炮位。所有这些都是和微波技术与微波电子学的发展分不开的。

另一方面，正是由于各类新型雷达的实际需要，才推动了无线电电子学的各个分支学科的迅速发展。例如，在需要精确地测量出数千公里以外的目标的现代超远程雷达中，在信息论的基础上研究并发明了许多新颖的接收方法。在微波技术方面，不断提高微波电子管的发射功率，研制各类新型的电控微波元件（例如铁氧体，半导体，铁电体，等离子体等元件），发明大型的快速广角扫描天线和信息加工天线，发展各种类型的低噪声微波放大器（例如参量放大器和量子放大器）等，都是当前的主要研究课题。发展以外层空间为基地的探空雷达，已经提上日程。这时，不必考虑大气的吸收，因而可以采用体积小、重量轻的毫米波雷达。近年来，在毫米波发生和毫米波传输等方面，也已取得很大的进展。

微波的另一重要应用是通讯。微波既是一个频率很高的波段，也是一个频带很宽的波段。它的频带比长波，中波，短波和超短波

的频带之和,还要宽上一千倍左右。采用微波,可以传递多路电报,电话和电视讯号。譬如,在载波频率 10,000 兆赫下,取它的百分之 0.01 频带就有 1 兆赫宽。如果利用单边带传输,可以容纳 10,000 路电话。在这样高的频率下,使用脉冲编码调制是很适宜的。这样,传输容量和品质又获得进一步改善。微波通讯不但解决了低频通讯波道拥挤的困难,而且还具有通讯容量高,抗干扰强和传递距离远等特点。

微波中继通讯是比较成熟的一种。在远距离的两地之间,每隔一短距离(40 到 60 公里),各装微波收发设备和定向天线,沿途各电台连续收讯、放大、发讯,使微波获得接力,继续传递到目的地。这种通讯方式具有通讯容量大,安装时间短,不受地理条件的限制等优点。现在,中继通讯一般采用厘米波。

微波散射通讯是另一种多路通讯的方式。它利用微波在对流层的散射性质来实现远距离的通讯。它的优点是不受地理条件的限制,不受太阳活动的影响,可以在相当远距离内进行可靠的通讯而不需要中继站。利用厘米波在对流层的散射传播,可靠的通讯距离约为 500 公里,而毫米波的通讯距离约为 100 公里。此外,1960 年以来,已经开始研究利用月球,人造卫星等对电波的反射来进行远距离通讯。例如,利用火箭把一个直径 30 米的塑料球(球面镀有铝层,作为电波的反射体)发射到距离地面约 1100 公里的近似圆形轨道上,成功地实现了相距 3600 公里的两地之间的通讯。看来,利用人造卫星进行全球的通讯,也不是遥远的事情了。

毫米波的频带极宽,但在空气中传播时,受到水蒸汽与氧气的影响,不能传播很远的距离。目前,正在研究利用圆波导来传输毫米波以克服上述的困难。研究结果表明,有可能实现极多路、超远程的  $H_{01}$  波的通讯。

在现代的船舰和飞机上,为了保证航行的安全,都装有无线电

导航设备。架设在机场、海港和停车场的特种雷达，可以指挥飞机，船舰的航行和车辆的行驶，能防止它们发生碰撞，并能使它们在恶劣的天气里安全地驾驶。如最近发表的 8.6 毫米波雷达，其最小作用距离为 10 米，最大作用距离为 20 公里，可以区分出停车场上的汽车和行人。装在船舰上的航海雷达，能在指示器的萤光屏上显示出四周的海洋情况。它不仅能使领航员有可能在雾天和夜间很有把握地引导船只，或沿很窄的航路入港，而且还有可能当船只和礁石或其他船只过分靠近时，使自动报警蜂鸣器发出警报。工作在微波波段的无线电六分仪，是在方向性图很窄的天线与灵敏度很高的接收机的基础上制造成的。它根据太阳的辐射来识别方向，能很准确地判定方位，并且能在任何气象条件下测定船只在海上的位置。

第二次世界大战以后，微波技术在其它科学领域内的应用扩展了，并且还正在扩展着。许多新兴的科学分支，如无线电波谱学，无线电天文学，无线电气象学，微波固体电子学等，都是建筑在微波的基础上的。

利用高灵敏度的微波接收机，可以直接观测天体本身的无线电辐射。利用雷达，可以把无线电脉冲送到天体，并接收反射回来的脉冲。这就形成了一支新兴的学科——无线电天文学。它的发展不仅能够发现过去没有被发现的新天体，而且还能使天文学从纯粹观测的科学提高到可以进行一定的实验。例如，利用大功率雷达，可以很准确地测出金星的距离。又如，最近利用 2 厘米和 8 毫米的设备，很准确地测出了太阳的温度。

雨，雪，云，雾对微波都有程度不同的吸收与反射，因而，可以利用厘米波和毫米波雷达来观测它们的存在和流动。这种气象雷达可以预报邻近地区的天气情况，包括风速，风向，雨，雪的分布，云层的高度及厚度。

在原子能的研究中，微波技术亦有着重要的应用。毫米波技术对可控热核反应的等离子体的测量，提供了最有效的方法。加速器(直线加速器和回旋加速器)的研制，亦是和微波技术的发展分不开的。

此外，微波在工业上和医学上也有着广泛的应用。

### § 1.3 微波技术的发展

在十九世纪末叶，人们利用火花隙发射机来产生微波，并对其性质进行了一些研究。由于用火花隙振荡器所产生的微波，功率很小，并且只能是衰减的振荡，它并没有实际应用的价值。此后，当较长波长的无线电通讯发明以后，在很长的一段时间里，这一波段就没有加以研究。从1920年开始，人们又注意到微波的产生，直到1939年才找到了产生不衰减的微波振荡的新方法。在这段时间里，各种各样类型的磁控管发明了，微波负栅管的工作亦改善了。在1939年到1940年的期间，在微波电真空器件的研制方面获得了巨大的成就。多腔磁控管、双腔速调管和反射速调管都一个接着一个地出现，并且很快地付诸实际。这些发明对提高振荡功率和振荡器的效率起了很大的作用。

在另一方面，自从麦克斯韦发表了电磁理论以后，人们就想到利用空心金属导管来传输电磁波，而在良好导体制成的空腔谐振器内激励起电磁振荡。显然，电磁波的这些性质和声波极其类似。在1897年，已有人指出这种相似性，并且把声学中的结论推广到电磁波。当时，这一问题的研究只限于理论上的探讨，很多年来，都没有获得应用。直到1936年，由于微波技术发展的实际需要，这一理论才获得证实。实验结果表明，电磁波在金属管中的损耗是不大的，因而引起了许多学者的注意。由于这一性质，使空心金属波导得到广泛的实际应用。同时，人们发现一段均匀扩展的开

口波导,可以用作辐射器,这段波导称为喇叭天线。一段封闭的短波导可以用作微波振荡系统的谐振回路,这段波导称为空腔谐振器。因此,波导可以用来传输电磁能量,辐射电磁能量,以及作为高频系统的谐振回路。约在1940年前后,上述的各种波导元件已得到了广泛的实际应用。在研究过程中,分析了电磁波在波导中的传播条件,测量了波在波导中的损耗,拟定出匹配波导系统的各种方法,解决了开口波导和喇叭的辐射问题,以及在空腔谐振器内电磁波的激励问题等等。所有这些工作都为建立各种不同用途的复杂波导系统提供了保证。

近年来,微波技术以飞快的速度向更短的无线电波扩展,主要是寻求毫米波及亚毫米波的产生、放大、传输和辐射的新方法。产生厘米波的一些方法已被推广用于产生毫米波。同时,人们已经发现利用某些固体的性质,可以产生和放大毫米波与亚毫米波。此外,在传输线方面,亦紧张地进行了探索工作,以寻求新的、更简单的厘米波和毫米波的波导系统。在这几年里,特别着重于 $H_{01}$ 型波的圆柱形波导的研究,以及敷有一层介质的单根导线,充有介质的扁带线等的传输线的研究。对充有铁氧体的波导元件的研究,亦非常重视。这些新型传输线和波导元件已给微波技术开辟了新的远景,并已获得了广泛的实际应用。

### 参考书刊

1. А. Д. Фортущенко 等, 无线电 60 周年纪念文集, 上海科学技术出版社, 1959 年。
2. 鲍家善, 吴培亨, 无线电电子学的发展趋势, 文汇报, 1962 年 7 月 29 日。
3. 黄宏嘉, 微波原理, 绪论和结束语, 科学出版社, 1963 年。

## 第二章 传输线理论

### 重点要求

- (1) 彻底了解传输线的基本方程及其解答。
- (2) 彻底了解传输线解答中各参量的物理意义:
  - (a) 传播常数;
  - (b) 特性阻抗;
  - (c) 反射系数。
- (3) 正确了解阻抗变换以及阻抗匹配的原理。
- (4) 了解电压驻波比和功率驻波比的意义。
- (5) 彻底掌握双极坐标阻抗图和阻抗圆图的数学推导及意义。
- (6) 熟练阻抗圆图的运用:
  - (a) 利用阻抗圆图求负载阻抗或负载导纳;
  - (b) 利用阻抗圆图求输入阻抗或输入导纳;
  - (c) 利用阻抗圆图解决传输线的匹配问题。

### § 2.1 引言

对于一般交流电路来说,在任一时刻,周历整个电路或沿着网络中任一分支各点的电流都相同。这种电路称为集总参量电路。在电工技术中,我们常常需要用两根长导线把电源功率传递到很远的距离,这两根长导线称为传输线。对于传输线来说,在任一时刻周历整个电路或沿着网络中任一分支各点的电流则不一定都相同。频率为 50 赫的电源,它的传输线约可有几百公里长。这些传输线虽然很长,但是和它所载的电波的波长相比较,它仍然很短。在传输线上传递的电波的速度约为光速( $3 \times 10^8$  米/秒); 50 赫的电波的波长约为 6000 千米。一条 600 千米长的传输线,当它传递频率为 50 赫的电波时,只相当于 0.1 波长。因此,在任意一时刻,电

路中各点的电流可以近似地认为是相同的。但是如果电波的频率增高,例如,增高到微波的频率范围,那么即使是几米长的传输线,在每一时刻,线上各点的电流都不相同,并且随着时间而变化。在这种情形下,我们不能再认为它是集总参量电路,而应当认为它在每单位长度上都具有一定大小的参量(电感  $l$ , 电容  $c$ , 电阻  $r$  和电导  $g$ ) 的电路。这种电路称为分布参量电路。

高频的传输线,按其结构的不同,可以划分为四种类型:(1)双线传输线,(2)四线传输线,(3)同轴传输线和(4)波导。

图 2.1 所示为两根平行的双线传输线,其间的距离远比电波为短。假设传输线和其它电路的距离较远(不受其它电路的影响),这时在一根导线上所通过的电流和另一根导线所通过的电流大小相等,方向相反。这是本章中所讨论的传输线理论的一个基本假设。

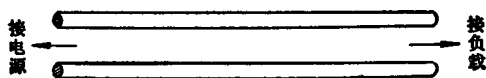


图 2.1 双线传输线

四线传输线由沿着小正方柱体四个对角棱边排列的四根长导线组成,如图 2.2 所示。把沿着对角棱边排列的两根导线并联起来,一端接电源,另一端接负载。这类传输线的优点是受到周围电路的影响较小。

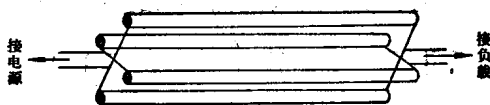


图 2.2 四线传输线

同轴传输线含有两个彼此绝缘的同轴圆筒导体(图 2.3)。外圆筒导体把内圆筒导体全部包围,故与外界其它电路完全隔离。

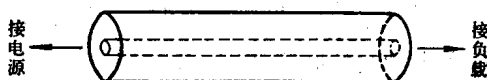


图 2.3 同轴线

波导为一空心的矩形或圆柱形截面的金属导管，在导管的一端注入某种频率的电磁波。注入的电磁波被导管的界壁反射。如果管壁系一理想的导体，则可使波的反射连续发生，使波在导管内行进很远的距离。用波导传播微波频率范围的电磁波，波的能量不致因辐射于管外而损耗。因此，使用波导是传播微波频率的电磁能量的最好方法。惟因管内各类不同反射波相互干涉，具有一定大小及形状的波导，仅能容许某些定型的电磁波传播。图 2.4 表示一矩形波导，其内充有均匀的介质。若于其开口的一端注入频率为  $f$  的电磁波，使它沿着管轴的方向（即  $z$  轴的方向）传播，则管内电磁场的分布情况，可用麦克斯韦场方程组结合边界条件，予以决定。

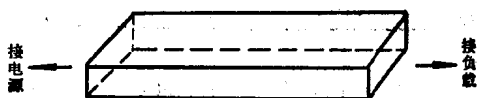


图 2.4 矩形波导

## § 2.2 传输线的基本方程

设有两根平行的长导线，各线的截面皆为均匀，一端与阻抗  $Z_g$  及电源  $E_g$  相连接，另一端与阻抗  $Z_L$  相连接（图 2.5）。传输线

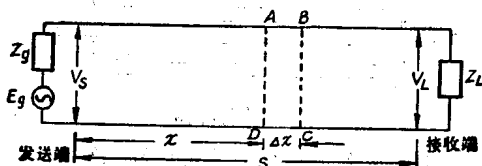


图 2.5 双线传输线的终端条件