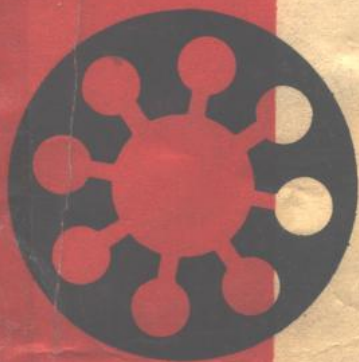


# 微波概論

孟 侃 編



上海科学技术出版社

# 微 波 概 論

孟 侃 編

上海科学技术出版社

## 內 容 提 要

本书先对微波的傳輸特性作簡明的叙述，然后介紹各种微波管的特性和电路，列举几种調制的方式和几种微波天綫的构造，扼要地述及微波的傳播特性，并对微波的一般应用作了簡明的介紹。本书适合一般大专学生及微波技术人員作参考。

## 微 波 概 論

孟 侃 編

\*

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

上海大东集成联合印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 1/32 印张 4 20/32 字数 100,000

1959年10月第1版 1962年9月第5次印刷

印数 11,001--12,300

統一书号：15119·1331

定 价：(十四)0.66元

# 目 录

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| 緒 論 .....                                            | 1  |
| 第一章 微波傳輸綫 .....                                      | 6  |
| 1-1 导綫的分布参数 .....                                    | 6  |
| 1-2 傳輸綫方程式 .....                                     | 8  |
| 1-3 傳輸綫的輸入阻抗 .....                                   | 10 |
| 1-4 傳輸綫图解法 .....                                     | 13 |
| 1-5 傳輸綫段的应用之一 -<br>$\frac{\lambda}{4}$ 綫作阻抗变换器 ..... | 16 |
| 1-6 傳輸綫段的应用之二 -<br>配合支綫 .....                        | 16 |
| 1-7 傳輸綫段的应用之三 -<br>波长表 .....                         | 17 |
| 1-8 功率測量 .....                                       | 18 |
| 第二章 波导 .....                                         | 19 |
| 2-1 波导理論的分析方法 .....                                  | 19 |
| 2-2 长方形波导 .....                                      | 21 |
| 2-3 圆柱形波导 .....                                      | 26 |
| 2-4 介質波导 .....                                       | 28 |
| 2-5 波导的反射及阻抗配合 .....                                 | 28 |
| 2-6 波导的激励和接收終端<br>設備 .....                           | 31 |
| 2-7 定向耦合器 .....                                      | 33 |
| 2-8 波导中电波之分隔与轉<br>化 .....                            | 33 |
| 2-9 波导的应用 .....                                      | 35 |
| 2-10 駐波比及功率的測量 .....                                 | 36 |
| 2-11 空腔諧振器 .....                                     | 36 |
| 第三章 微波管及其电路 .....                                    | 39 |
| 3-1 負柵三极管的頻率限制 .....                                 | 39 |
| 3-2 正柵管振盪器 .....                                     | 44 |
| 3-3 速調管 .....                                        | 46 |
| 3-4 磁控管 .....                                        | 51 |
| 3-5 行波管 .....                                        | 58 |
| 3-6 回波管 .....                                        | 59 |

## 第四章 調制.....60

- |                |    |                 |    |
|----------------|----|-----------------|----|
| 4-1 調制概論 ..... | 60 | 4-3 調頻及調相 ..... | 68 |
| 4-2 調幅电路 ..... | 66 | 4-4 脉冲調制 .....  | 70 |

## 第五章 微波天綫.....71

- |                      |    |                   |    |
|----------------------|----|-------------------|----|
| 5-1 天綫的放射图型 .....    | 71 | 5-6 喇叭 .....      | 80 |
| 5-2 微波饋电綫及放射元件 ..... | 74 | 5-7 拋物反射面天綫 ..... | 81 |
| 5-3 微波双极天綫 .....     | 75 | 5-8 透鏡天綫 .....    | 83 |
| 5-4 縫隙天綫 .....       | 76 | 5-9 介質天綫 .....    | 85 |
| 5-5 天綫陣 .....        | 77 |                   |    |

## 第六章 微波傳播.....86

- |              |    |                |    |
|--------------|----|----------------|----|
| 6-1 折射 ..... | 86 | 6-4 吸收衰减 ..... | 92 |
| 6-2 反射 ..... | 89 | 6-5 衰落 .....   | 94 |
| 6-3 繞射 ..... | 92 | 6-6 散射 .....   | 94 |

## 第七章 微波的接收.....97

- |                 |     |                    |     |
|-----------------|-----|--------------------|-----|
| 7-1 概論 .....    | 97  | 7-5 本机振盪器.....     | 102 |
| 7-2 接收机杂音 ..... | 98  | 7-6 中頻放大器.....     | 103 |
| 7-3 射頻放大 .....  | 99  | 7-7 檢波器及視頻放大器..... | 105 |
| 7-4 混頻器.....    | 100 |                    |     |

## 第八章 微波接力制通訊体系 .....106

- |                          |     |                          |     |
|--------------------------|-----|--------------------------|-----|
| 8-1 概論.....              | 106 | 8-6 多路調制.....            | 109 |
| 8-2 微波接力制所使用的波<br>段..... | 107 | 8-7 多波道制傳送.....          | 111 |
| 8-3 通訊体系的杂音.....         | 107 | 8-8 軍用微波接力制.....         | 111 |
| 8-4 微波通訊的衰落現象.....       | 108 | 8-9 微波散射接力通訊.....        | 115 |
| 8-5 微波接力制的天綫.....        | 108 | 8-10 微波长途波导傳輸体<br>系..... | 116 |

## 第九章 雷达 .....118

- |                    |                     |
|--------------------|---------------------|
| 9-1 概論.....118     | 9-5 接收体系.....126    |
| 9-2 雷达发送体系.....119 | 9-6 雷达标志.....129    |
| 9-3 雷达天綫.....121   | 9-7 雷达在导航中的应用...130 |
| 9-4 收发两用器.....125  | 9-8 雷达在軍事方面的应用131   |

## 第十章 微波的特殊应用 .....134

- |                             |                     |
|-----------------------------|---------------------|
| 10-1 无綫电天文学.....134         | 10-4 原子钟.....139    |
| 10-2 微波在气象方面的应<br>用.....136 | 10-5 微波与原子能.....140 |
| 10-3 微波波譜仪.....138          | 10-6 微波与光学.....140  |
|                             | 10-7 介質測定.....142   |

## 緒 論

1864年麦克斯韦确立了电磁波的理论,1895年波波夫发明无线电,实际的证实了电磁波理论。从此理论推动实验,实验又扩展了理论,无线电不停的向前发展着。发展的主流是频率加高,波长缩短,由长波而中波、短波、超短波,以至微波。各波段的区分大致如下:

|     |                            |
|-----|----------------------------|
| 长 波 | 10000~1000 米(30~300 千周)    |
| 中 波 | 1000~100 米(300~3000 千周)    |
| 短 波 | 100~10 米(3~30 兆周)          |
| 超短波 | 10~0.1 米(30~3000 兆周)       |
| 微 波 | 0.1~0.001米(3000~300000 兆周) |

微波的波长已接近于红外线的波长,微波的性质是介于普通无线电波和光波之间,而更接近于光波,它的反射、折射、绕射、散射、吸收等作用比短波也显著得多。最早的无线电所用的波长是长波,长波的传播情况是频率越高,衰减越大,因此当初曾认为短波不能适用于远距离的通讯;以后业余无线电家发现短波信号可在极远的距离以外收听得到,待天空电离层的反射作用明了后,短波在远距离通讯和广播中已广泛的应用。由于短波波段所能容纳的电台数目有限,容易互相干扰,为了能同时传送更多的信号,又促使无线电继续向超短波波段和微波波段

发展。超短波和微波都不受电离层反射，因此过去也曾认为超短波及微波只能在直視距离内进行通訊；但近来又发现借散射作用，超短波和微波訊号可在极远的距离之外收到，所以現在超短波及微波的傳播問題，面临着与过去短波所遭遇到的相同的情况，超短波及微波通訊范围，将大大的越出直視距离。現在利用电离层的散射作用，超短波的傳播距离可达 2,000 公里，利用空气对流层的散射作用，微波的傳播距离可以达到 800 公里，因此利用超短波及微波作远距离的通訊可能性正在发展着。

除去扩展頻率范围，增加无綫电的使用机会外，微波之所以能够发展，也有其本身独具的优点，这些优点是：

第一，在微波波段可制成輕巧而方向性极强的天綫，利用定向天綫，微波放射可限制在一定方向的有限范围之内，提高了效率；电台与电台之間的干扰机会也减少了，并且也不象短波发射那样，各方面都会收到，所以保密性也增加了。

第二，微波波段所包括的范围很广，可以容納許多电台，拥挤現象不复存在。寬頻帶的訊号，如电视、脉冲調制等，可以应用微波电台来傳送。

第三，短波通訊質量不高，杂音大，干扰多，气候、季节、日、夜等均有影响，衰落現象严重，而微波杂音少，不受电离层的影响，无须按季节和昼夜調換波长，微波通訊的質量可以比短波高得多。

由于微波具有这些优点，除了通訊应用外，微波技术已应用到科学技术的各个领域：測位、导航、天文、气象、原子能研究和導彈控制等，都因微波技术的应用而改观。

微波技术最先用于雷达，在第二次大战中发展最快，由于軍事需要，研究逐步深入，大大丰富了微波的理論与經驗，过去主

要应用厘米波，現在已进入了毫米波。雷达不但能显示目标光点，而且也能显示影像了。由于大功率微波管的制成，微波雷达使用范围可远至 600 公里以外。

第二次世界大战以后，微波在通讯方面的应用，有了迅速的发展。其中主要是多路微波接力制通讯体系的广泛采用。利用微波中继站，把微波讯号連續的接收、发送，来实现远距离的通讯。目前微波接力制能够通达的最长距离达 6,000 公里以上，一条中继线路可同时傳送 3,600 路电话，效率既高，费用又省，这是长途通讯的巨大变革。

此外，微波散射制长距离通讯体系，也正在研究中，这要比微波接力制的维护来得更简单，费用更节省。

微波通讯的另一主要发展方向与普通长途载波电话很相似，利用波导长距离傳送波长极短的微波，借中继站放大，这样，当傳送多路电视、电话节目，不会受气候及吸收等因素的影响，通讯质量可更高。

某些星球除能放射可见的光谱之外，也能放射出其它波长的电磁波，它们的波长从几毫米至 20 米，这些电磁波都能穿透大气层到达地面来。有定向天线的微波接收机能在任何条件下收到星球的电磁波，这样就能观察天空的情况；所谓无线电望远镜，就是这种有定向天线的无线电接收机。

利用毫米波雷达和氢气球所携带的微波雷达，对高空气象所作的观测，已日趋完善，这对气象学的发展有极大的帮助。

其它如微波直线加速器对原子能的研究，微波频谱仪对分子结构的研究，微波光学对晶体结构的研究等，都有密切的关系。现在各种微波仪器已是近代物理实验中不可缺少的设备了。

当然，微波能如此广泛的应用，与各种微波管的发明是分不

开的，微波管是各种微波设备的核心。最初想改良普通真空管的构造，如电极形状、尺寸、距离等，使能在更高频率方面应用。制造了花生管、门柄管、灯塔管等超高频管。但是因为在这管子内，电子渡越时间的影响无法根本消除，使用的频率仍受到限制，所以微波管后来就主要向磁控管、速调管、行波管、晶体两极管等方面发展。

1921年，赫尔发表了磁控管的基本理论。后来就制造出了负阻磁控管、渡越时间磁控管，但是所得到的效率和所达到的频率都不够高。1932年，苏联穆希恩曾建议用多腔磁控管产生强力微波振荡，这个建议当时未受到注意，直至1939年才由苏联阿列克西也夫(Алексеев)和莫里耶罗夫(Моляров)合作制成了第一个多腔磁控管，使雷达技术能高度发展。

1932年苏联罗然斯基(Рожанский)发表了速调管理论。1939年美国斯坦福大学范里恩兄弟制成了双腔速调管，可作微波振荡和放大之用。1940年苏联柯伐林柯(Коваленко)制成反射速调管，利用这种管子能作可变频率的微波振荡器。现在又制成了多级速调管，可加大功率、加宽频率。

1946年皮尔斯发明行波管，可以用来放大宽频带的微波信号。现在行波管主要的发展是向加大功率，减少杂音两方面去改良。最近又制成了可产生毫米波的回波管，可在很宽的范围內调节频率。

由于微波检波和混频的需要，最早应用过的矿石检波器又受到了注意，因此加深了对半导体的研究，终于制成了锗和砷检波管。

微波电子管和普通电子管比较起来，在原理、构造、特性等方面的差别很大。普通电子管的放大、振荡、调制电路等在微波

方面都有改变。应用了各种新式微波管,可将普通电子管繁复的电路简化,例如磁控管本身就是一只振荡器。但是整个微波电路体系在理论方面比低频无线电电路复杂得多。

微波的波长极短,一小段线可相当于若干波长,放射、衰减和阻抗配合等问题都更为复杂。微波的传输不得不应用同轴线和波导。在微波波段不能应用集中参数元件,要用按传输线及波导理论制成的分布参数元件,这类元件如微波谐振器、滤波器、阻抗变换器等都是。

微波天线原理的发展是与微波应用的推广相辅相成的,从简单的双极天线起研究出了各式各样的微波天线;如抛物反射镜天线、透镜天线、介质天线、天线阵、缝隙天线、喇叭天线等;微波天线的方向性愈来愈高,尺寸也愈来愈小,例如5毫米波长、0.6米直径的抛物反射镜天线,它的功率增益可高至50分贝,放射瓣宽度只有 $\frac{1}{2}$ 度。

在微波波段进行测量电流电压是很困难的,所以微波测量的对象与低频不同,主要是功率、波长、驻波比等项。所用的测量仪器是十分精密的,制造毫米波测量仪器技术的精细程度,不亚于珠宝的磨琢,使用仪器应掌握的理论水平,比使用低频仪器的要求也高得多。

微波传播的知识虽然逐渐地丰富了,但是比短波还是差得很远,并且还没有系统化,由于所牵涉的面很广,还有待继续作详尽的研究。

# 第一章 微波傳輸綫

單純的電感、電容或電阻的集中參數元件，在一般高頻時已屬難得，在微波更是少有，微波電路元件都是用小段同軸綫或波導組合而成的分布參數元件，所以構成微波傳輸電路體系的各個部件的基本理論，是建立在微波傳輸綫理論的基礎之上，學微波須先學傳輸綫理論，正如讀電工先要學習交直流電路理論。本章就傳輸綫理論及簡單微波元件作簡要介紹。

## 1-1 導綫的分布參數

導綫的分布參數最基本的有電阻、電感、電容、電導四項，由於集膚效應，頻率加高時電流就趨向導体的表面，這四項參數都要受到頻率的影響。

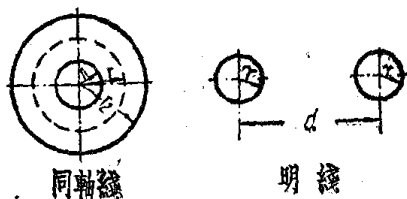


圖 1-1 同軸綫及明綫

單明綫的電阻  $R$  與頻率的關係（參照圖 1-1），可按下列式計算：

$$R = \frac{1}{r} \sqrt{10^{-9} f \rho} \text{ 歐/厘米} \quad (1-1)$$

式中:  $r$ ——导线半径(厘米);

$\rho$ ——导体比电阻(欧/厘米);

$f$ ——频率(周/秒)。

双明线的电阻为:

$$R = \frac{2}{r} \sqrt{\frac{10^{-9} f \rho}{\left(1 - \frac{4r^2}{d^2}\right)}} \text{ 欧/厘米} \quad (1-2)$$

式中:  $r$ ——导线半径;

$d$ ——导线中心之间的距离。

同轴线的电阻为:

$$R = \sqrt{10^{-9} f \rho} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \text{ 欧/厘米} \quad (1-3)$$

式中:  $r_1, r_2$ ——内外导线的半径。

由于集肤效应, 频率加高时, 导线的电感减少, 在相当的高频, 双明线的电感为:

$$L_p = \frac{\mu}{\pi} \log_e \left( \frac{d}{r} \right) \text{ 亨/米} \quad (1-4)$$

式中:  $\mu$ ——围绕导线的介质的导磁系数;

同轴线的电感为:

$$L_c = \frac{\mu}{2\pi} \log_e \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \text{ 亨/米} \quad (1-5)$$

双明线的电容为:

$$C_p = \frac{\pi \epsilon}{\log_e \left( \frac{d}{r} \right)} \text{ 法/米} \quad (1-6)$$

式中:  $\epsilon$ ——围绕导线的介质的介电常数。

同轴线的电容为:

$$C_c = \frac{2\pi\epsilon}{\log_e \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} \text{ 法/米} \quad (1-7)$$

双明线两线之间，一般都是空气介质，支撑导线的绝缘子很少，所以线与线间的电导损耗不严重。在所传输的功率不超过 1 瓦时，同轴线间常应用固体介质绝缘，若介质的比电导为  $g$ ，则同轴线的电导为：

$$G_c = 2\pi \frac{g}{\log_e \frac{r_2}{r_1}} \text{ 姆/米} \quad (1-8)$$

## 1-2 传输线方程式

传输线的分析多用普通电路的分析方法，从电压电流的观念出发。若  $R$ 、 $L$ 、 $C$ 、 $G$  分别代表单位长度导线的电阻、电感、电容和电导，则单位长度导线的串联阻抗为：

$$Z = R + j\omega L \quad (1-9)$$

单位长度导线的并联导纳  $Y$  为：

$$Y = G + j\omega C \quad (1-10)$$

如图 1-2 所示将导线与高频电源及负载阻抗相接，则在  $Z_R$  终端阻抗之左  $x$  距离处，导线间的微量电压和微量电流与导线的分布参数的关系如下：

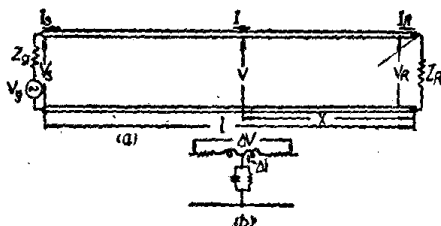


图 1-2

a—传输线； b—一小段传输线的等值电路

$$dV = I(R + j\omega L)dx = IZdx \quad (1-11)$$

$$dI = V(G + j\omega C)dx = VYdx \quad (1-12)$$

联解两方程式得

$$\frac{d^2V}{dx^2} = ZYV \quad (1-13)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = ZYI \quad (1-14)$$

(1-13)、(1-14)是标准的两次微分方程式,其解为:

$$V = \frac{V_R}{2} \left(1 + \frac{Z_0}{Z_R}\right) e^{\gamma x} + \frac{V_R}{2} \left(1 - \frac{Z_0}{Z_R}\right) e^{-\gamma x} \quad (1-15)$$

$$I = \frac{I_R}{2} \left(1 + \frac{Z_R}{Z_0}\right) e^{\gamma x} + \frac{I_R}{2} \left(1 - \frac{Z_R}{Z_0}\right) e^{-\gamma x} \quad (1-16)$$

式中:  $Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}}, \quad \gamma = \sqrt{ZY} \quad (1-17)$

(1-15)及(1-16)两式中  $e^{\gamma x}$  和  $e^{-\gamma x}$  两项,分别代表向  $Z_R$  傳送和自  $Z_R$  反射的电流、电压波。当  $Z_R = Z_0$  时,  $e^{-\gamma x}$  项反射波不存在,故  $Z_0$  称做导线的特性阻抗;这种传输情况称做负载阻抗与导线配合。线上电流电压幅度及相位的变化与  $e^{\gamma x}$  和  $e^{-\gamma x}$  成比例,故  $\gamma$  称做导线的传导常数,  $\gamma$  是复数,有实数和虚数两部分:

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \alpha + j\beta \quad (1-18)$$

上式中的  $\alpha$  与波的幅度有关,称做衰减常数,  $\beta$  与波的相位有关,称做相移常数。

$Z_0, \gamma$  与导线的分布参数有下列近似关系:

$$Z_0 \doteq \sqrt{\frac{L}{C}} \left[ 1 - j \left( \frac{R}{2\omega L} - \frac{G}{2\omega C} \right) \right] \quad (1-19)$$

$$\gamma \doteq \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} + j\omega \sqrt{LC} \quad (1-20)$$

在  $R, G$  皆甚小时:

$$Z_0 \doteq \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1-21)$$

$$\gamma \doteq j\beta = j\omega \sqrt{LC} \quad (1-22)$$

低损耗线上波长  $\lambda$  及相速  $v$  与频率  $f$  的关系如下:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{1}{f \sqrt{LC}} \quad (1-23)$$

$$v = f\lambda = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1-24)$$

### 1-3 传输线的输入阻抗

将(1-15)及(1-16)两式重行安排后可得

$$V = V_R \left( \cosh \gamma x + \frac{Z_0}{Z_R} \sinh \gamma x \right) \quad (1-25)$$

$$I = I_R \left( \cosh \gamma x + \frac{Z_R}{Z_0} \sinh \gamma x \right) \quad (1-26)$$

从  $x$  处的电压、电流关系, 可求出该处传输线的输入阻抗为:

$$Z = \frac{V}{I} = Z_0 \left( \frac{Z_R + Z_0 \tanh \gamma x}{Z_0 + Z_R \tanh \gamma x} \right) \quad (1-27)$$

当  $Z_R$  等于  $Z_0$  时无反射波, 输入阻抗  $Z$  在各处皆等于  $Z_0$ ; 当  $Z_R$  不等于  $Z_0$  时有反射波存在, 各点输入阻抗不同。在输出端反射波与投射波幅度之比  $r_R$ , 称做终端反射系数。从(1-25)及(1-26)两式可求出:

$$r_R = \frac{Z_R - Z_0}{Z_R + Z_0} \quad (1-28)$$

反射系数常用驻波比  $\rho$  来表示，驻波比是投射波与反射波幅度之和  $V_{\max}$  对其波幅之差  $V_{\min}$  的比值：

$$\rho(\text{SWR}) = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |r_R|}{1 - |r_R|} \quad (1-29)$$

在微波测量技术上， $\rho$  是很重要的传输线参数。 $\rho$  可以很准确的从测量结果中计算出来。图 1-3 表示同轴线驻波比测定器，一根小的探针伸入开槽的同轴线中一小部分，探针与晶体检波器和微安表联接。探针实际上所测量的是同轴线内的电场强度，但电场强度是与导线间电压成比例的，所以驻波比测定器可作为电压的测定设备。驻波比测定器上有标尺，可量出电压最大点及最小点与终端阻抗之距离。



图 1-3 同轴线驻波比测定器

$$\text{令} \quad V'_R = V_R \frac{\left[1 + \frac{Z_0}{Z_R}\right]}{2},$$

则线上任一点的电压、电流关系可以  $r_R$  表示如下：

$$V = V'_R e^{\gamma z} (1 + r_R e^{-2\gamma z}) \quad (1-30)$$

$$I = \frac{V'_R}{Z_0} e^{\gamma z} (1 - r_R e^{-2\gamma z}), \quad (1-31)$$

$$Z = \frac{V}{I} = Z_0 \left( \frac{1 + r_R e^{-2\gamma z}}{1 - r_R e^{-2\gamma z}} \right) \quad (1-32)$$

在沒有損耗的線上，有两种情况反射最严重，一种是终端短路，一种是终端开路。