

# 浙江大学实验报告

实验名称：波导传输线负载特性测量与阻抗匹配

实验日期：2023/5/23

## 一、实验目的和要求

### 1.1 实验目的

了解波导传输线的基本特性，容性膜片的负载特性及阻抗匹配方法。

覆盖的基本概念：

- (1) 波导的传输线模型
- (2) 波导色散特征——波导波长
- (3) 阻抗及匹配
- (4) 史密斯圆图

### 1.2 实验要求

- (1) 根据实测值计算波导波长 $\lambda_g$ 。
- (2) 计算实测频率下矩形波导 $TE_{10}$ 模的波导波长 $\lambda_g$ 的理论值，并与实验测量值比较。
- (3) 计算容性膜片+匹配负载时的驻波系数 $\rho$ ，在 Smith 圆图上读出容性膜片+匹配负载的反射系数 $\Gamma$ 和归一化阻抗值。
- (4) 计算用单销钉调节匹配后的驻波系数。
- (5) 量出单销钉调配器销钉到负载的长度，计算匹配状态时销钉所呈现的归一化电抗值。借用圆图说明此时系统为什么匹配？

## 二、实验原理

纵向均匀的波导，如果将场分解成 TE 及 TM 两种模式，每种模式的场分解成横向场量与纵向场量，再将横向场量分解成模式函数与幅值的乘积，即  $\vec{E}_t = \vec{e}(\rho)V(z)$ ,  $\vec{H}_t = \vec{h}(\rho)I(z)$ ，则 $V(z)$ 、 $I(z)$ 满足传输线方程：

$$\begin{cases} \frac{dV(z)}{dz} = -jk_z Z I(z) \\ \frac{dI(z)}{dz} = -jk_z Y V(z) \end{cases}$$

式中  $k_z^2 = k^2 - k_t^2$ ,  $k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$

$$Z = \frac{1}{Y} = \begin{cases} \frac{\omega\mu}{k_z} & TE \\ \frac{k_z}{\omega\epsilon} & TM \end{cases}$$

$V(z)$ 、 $I(z)$ 反映电磁场横向分量  $\vec{E}_t$ 、 $\vec{H}_t$ 沿纵向 $Z$ 的变化。所以就波的纵向传播而言，波导中某一模式电磁波的传播可用一特定参数 ( $k_z$ ,  $Z$ ) 的传输线等效。

本实验应用矩形波导传输线，工作于  $TE_{10}$  模式，其横向场  $\vec{E}_t$ 、 $\vec{H}_t$ 沿纵向 $z$ 的传输特性可用 ( $k_{z01}$ ,  $Z_{01}$ ) 为特征参数的传输线上电压、电流的传播等效。

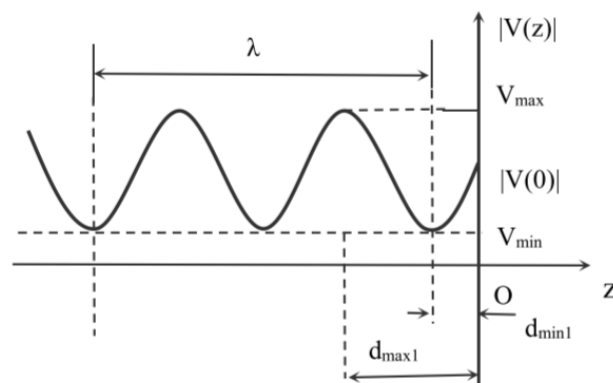


图 1-1 传输线上电压沿线分布

传输线的状态可以用以下五组参数等价表示，即电压与电流  $(V, I)$ ，入射波与反射波  $(V_i, V_r)$ 、反射系数  $(\Gamma = |\Gamma|e^{j\phi})$ ，阻抗或导纳  $(Z = \frac{1}{Y})$ 、驻波系数与驻波相位  $(\rho, d_{min1}/\lambda_g)$ 。这五组参数相互间可以变换。最常用的是反射系数  $\Gamma$ ，在微波频率下它是一个便于测量的量值。使用驻波测量线， $(\rho, d_{min1}/\lambda_g)$  也是一组便于测量的量值。

图 1-1 所示为电压沿传输线的分布状况，这种分布叫做驻波。

定义传输线上电压最大值与最小值之比为驻波系数 VSWR, 常用  $\rho$  表示。

离开终端负载第一个电压波节点的位置为  $d_{min1}$ ，如果用波长  $\lambda$  归一化，即  $\tilde{d}_{min1} = d_{min1}/\lambda$ 。

如果波导末端短路（即传输线终端短路），则在传输线上形成纯驻波。驻波两最小点之间的距离为  $\lambda_g/2$ ，由此可测出波导波长  $\lambda_g$ 。

波导中波的传播状态一般由波导终端口所接的负载确定，因此通过测量波导中波的传播状态便可得到其负载特性。

如果矩形波导（截面为  $a \times b$ ）插入一膜片，膜片上开槽，其截面为  $(a \times b')$ ， $b' < b$ ，则该膜片的等效阻抗呈电容性，叫做容性膜片。本实验用容性膜片+匹配负载作为容性被测负载。

实验涉及的公式

$$\Gamma(0) = \frac{Z(0) + Z}{Z(0) - Z} = |\Gamma(0)|e^{j\phi(0)}$$

$$Z(0) = Z \frac{1 + \Gamma(0)}{1 - \Gamma(0)} \quad (\Omega)$$

$$\rho = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |\Gamma(0)|}{1 - |\Gamma(0)|}$$

$$\tilde{d}_{min1} = d_{min1}/\lambda$$

$$d_{min1} = \frac{\phi(0)\lambda_g}{4\pi} + \frac{\lambda_g}{4} \quad (cm)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (cm)$$

式中  $a$  为矩形波导宽边，本实验中  $a = 2.268cm$ ， $b = 1.016cm$ 。

三、实验内容及结果

1. 建立实验装置如图 1-2

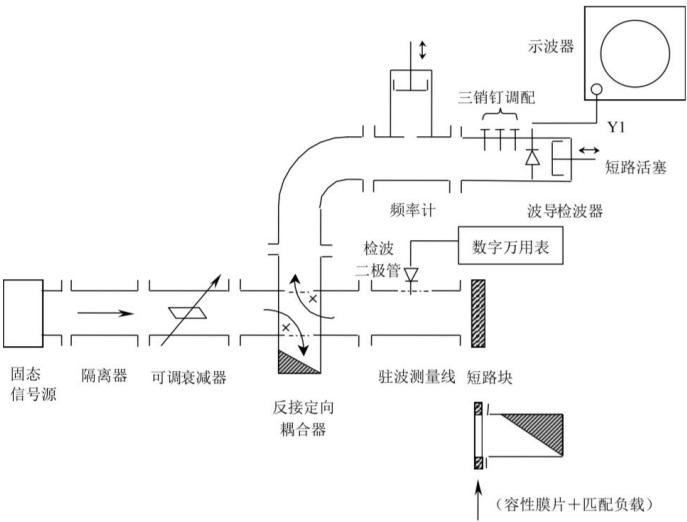


图 1-2

2. 工作频率 $f$ 测量

- (1) 测量线开口端用短路块短接。

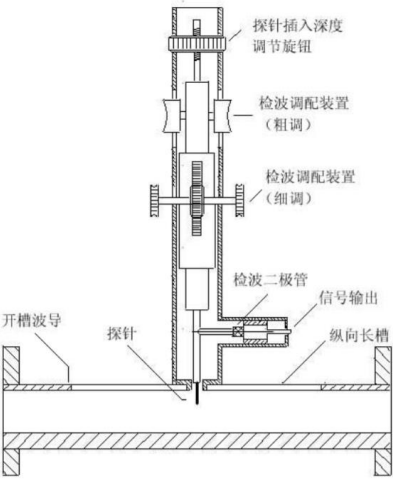


图 1-3 波导驻波测量线结构示意图

- (2) 接通固态微波信号源，工作状态选择方波调制。
- (3) 调节波导检波器中的短路活塞或三销钉调配器使示波器上显示的检波输出（方波）幅度最大。如果示波器上显示的输出幅度不够大，可适当减少可调衰减器的衰减量，反之可增加衰减器的衰减量。



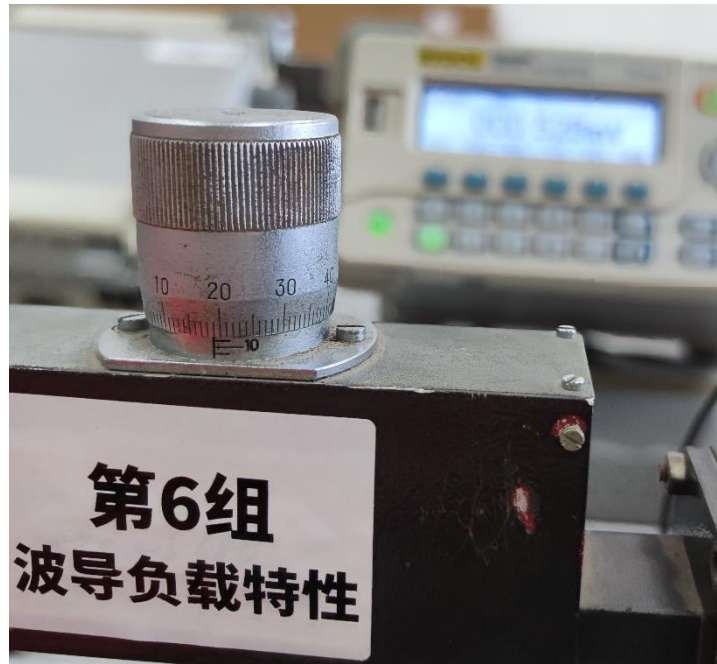


图 1-6 可调衰减器示数

- (2) 慢慢横向移动测量线探针，得到相邻两个驻波波节的位置 $d_{min1}$ 、 $d_{min2}$ 的刻度值。

$$d_{min1} = 3.740cm, \quad d_{min2} = 5.970cm$$



图 1-7、1-8 驻波波节刻度（以下方刻度值为准）

- (3) 波导波长的计算:  $\lambda_g = 2(d_{min2} - d_{min1}) = 4.46cm$

检验,

$$\lambda^2 = \frac{\lambda_g^2}{1 + \frac{\lambda_g^2}{4a^2}} \Rightarrow \lambda = \sqrt{\frac{\lambda_g^2}{1 + \frac{\lambda_g^2}{4a^2}}} = 3.18cm$$

根据频率计读数，

$$\lambda = \frac{c}{f} = 3.20cm$$

两数接近，因此认为测量值准确，实验无误。

#### 4. 容性膜片等效负载的测量

- (1) 测量线开口接短路块，横向移动测量线探针，找到一个驻波波节点位置

$$d_{min1(短)} = 5.970cm。$$

- (2) 拆下短路块，接上容性膜片+匹配负载，从 $d_{min1(短)}$ 位置向振荡源信号方向移动驻波测量线探针位置，测得第一个驻波最小点位置 $d_{min1(膜片)} = 5.760cm。$



图 1-9 容性膜片+匹配负载时驻波波节刻度

- (3) 测量此时的驻波系数，在万用表上读出检波输出最大值 $P_{max} = 0.232$ ，最小值

$$P_{min} = 0.007, \text{ 则 } \rho = \sqrt{\frac{P_{max}}{P_{min}}} = 1.820$$







图 1-10、1-11 万用表最大、最小值示数

(4) 负载的反射系数求解

$$|\Gamma(0)| = \frac{\rho - 1}{\rho + 1} = 0.291$$

$$\Gamma(0) = 0.291e^{j177.30^\circ}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_g} = 140.88 \text{ rad/m}$$

$$l_{\min} = |d_{\min 1(\text{短})} - d_{\min 1(\text{膜片})}| = 0.21 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \frac{l_{\min}}{\lambda_g} = 0.047$$

$$z_l = \frac{1 - j\rho \tan kl_{\min}}{\rho - j \tan kl_{\min}} = 0.584 - j0.021$$

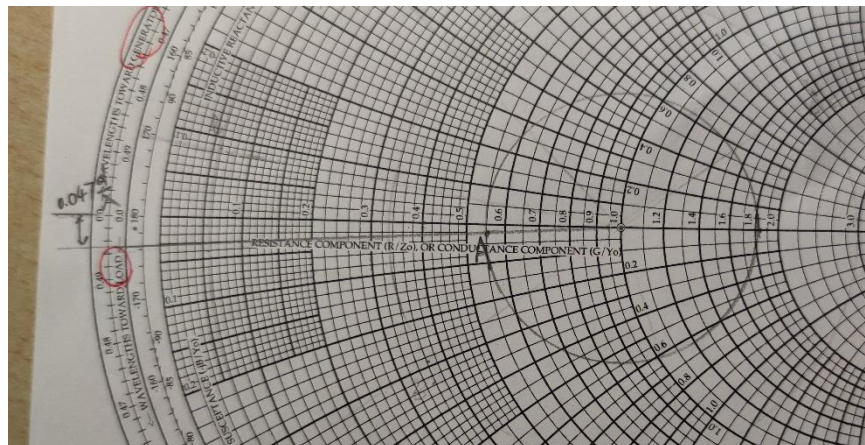


图 1-12 史密斯圆图

读史密斯圆图得到,  $z_A = 0.55 - j0.2$ ,  $\Gamma = 0.295e^{-j178.2^\circ}$ , 均与前面的计算值接近, 在可接受误差范围之内。

## 5. 阻抗匹配测量

在测量线和容性膜片+匹配负载之间串接一个单销钉调配器。

- (1) 调节衰减器衰减量, 使示波器有足够的方波信号显示。
- (2) 细心调节销钉调配器销钉的横向位置和插入波导的深度, 使示波器上显示的信号最小。进而提高示波器灵敏度和增加输入功率, 重复上一调节过程直到示波器的灵敏度为最高、输入功率最大且示波器上观察到的信号最小为止, 即找到最佳匹配位置。
- (3) 适当增加可调衰减器的衰减量, 横向移动驻波测量线, 记录该输入功率下数字万用表上的  $P_{\max(\text{匹配})} = 0.183$  和  $P_{\min(\text{匹配})} = 0.034$ , 并计算此时的驻波系数  $\rho = 2.32$ 。



图 1-12、1-13 匹配时万用表最大、最小值示数

以  $\rho = 2.32$  作反射系数圆, 与  $g = 1$  圆交于  $B$  与  $B'$  点,  $B'$  点导纳  $Y_{B'} = 1 - j0.85$ , 则单销钉的电抗为  $-j\frac{1}{0.85} = -j1.18$ 。此时匹配是因为阻抗并联单销钉时, 经过等  $g = 1$  圆旋转到了中



心点，即匹配点。实验测得单销钉长度为 $0.65\text{cm}$ 。

#### 四、思考题

- (1) 能够测出波导波长，再通过史密斯圆图上的变换，可以由任意负载推导出波导波长。
- (2) 驻波相位等于驻波最小点和短路点之间的相位差，即 $d_{min}$ 。
- (3) 伸入波导不利于后续最佳匹配位置的寻找。
- (4) 输出指示越小，则调配器与负载之间的波更趋近于行波，表示负载匹配状态良好。
- (5) 单销钉调配器和负载之间是行波。但单销钉调配器和信号源之间不一定是行波。

#### 五、实验总结与心得体会

本次实验我们从波导传输线的理论出发，对波导传输线的实际特性进行研究。我们学会了测量波导波长、波导传输线的负载特性，还学会了单销钉匹配的原理和应用。本次实验我们最大的收获就是耐心和细心，不能盲目追求速度，虽然我们结束得很晚，但是还是圆满完成了实验，累并快乐着。

扣分

波导波长 -2

$\rho$  匹配 -1

思考题 1 -2

思考题 3 -1

思考题 5 -5