

# 波导传输线负载特性测量与阻抗匹配

3240102873 胡东东

## 一、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) 波导色散特性——波导波长
- (3) 阻抗及匹配
- (4) Smith 圆图

## 二、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<sub>10</sub> 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?

## 三、实验原理

纵向均匀的波导，将场分解为 TE、TM 两类模式，每种模式的场可拆分为横向场量与纵向场量，再将横向场量分解为模式函数与幅值的乘积，电压、电流满足传输线方程：

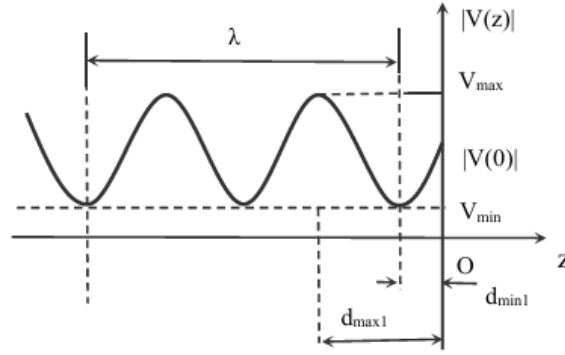
$$\begin{cases} \frac{dV(z)}{dz} = -jk_z Z I(z) \\ \frac{dI(z)}{dz} = -jk_z Y V(z) \end{cases}$$

横向电磁场表达式： $\vec{E}_t = \vec{e}(\rho)V(z)$ ,  $\vec{H}_t = \vec{h}(\rho)I(z)$ 。式中纵向传播常数与自由空间波数、横向截止波数满足： $k_z^2 = k^2 - k_t^2$ ,  $k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$

TE、TM 模式等效波阻抗： $\begin{cases} \omega\mu/k_z & TE\text{模式} \\ k_z/\omega\mu & TM\text{模式} \end{cases}$

$V(z)$ 、 $I(z)$ 描述横向电磁场 $\vec{E}_t$ 、 $\vec{H}_t$ 沿传输纵向 $z$ 轴的变化规律。从波纵向传播特性来看，波导内单一模式电磁波可等效为一组特征参数 $(k_z, Z)$ 的传输线模型。

本实验采用矩形波导，工作主模为 $TE_{10}$ 模，该模式横向场沿 $z$ 轴的传输特性可等效为特征参数 $(k_{z01}, Z_{01})$ 传输线上电压、电流的传播规律。



传输线上电磁波分布状态可通过五组等价参数描述：电压电流 $(V, I)$ 、入射波与反射波 $(V^i, V^r)$ 、反射系数 $\Gamma = |\Gamma|e^{j\psi}$ 、阻抗或导纳 $(Z = 1/Y)$ 、驻波系数 $\rho$ 与第一个电压波节点位置 $d_{\min1}/\lambda_g$ ，五组参数之间可相互换算。微波频段下反射系数 $\Gamma$ 便于测量；借助驻波测量线，驻波系数 $\rho$ 与归一化波节点位置 $d_{\min1}/\lambda_g$ 也可直接测得。

传输线上电压幅值沿纵向呈周期性起伏分布，该分布称为驻波。定义传输线上电压最大值与最小值之比为驻波系数（电压驻波比 VSWR），记作 $\rho$ ； $d_{\min1}$ 为距离终端负载最近的第一个电压波节点位置，归一化形式为 $\bar{d}_{\min1} = d_{\min1}/\lambda_g$ 。

若波导终端短路，传输线内形成纯驻波，相邻两个电压波节点间距为 $\lambda_g/2$ ，利用该特性可测量波导波长 $\lambda_g$ 。波导内电磁波的传播状态完全由终端负载决定，因此通过测量线上驻波分布特征，即可反推终端负载的阻抗特性。

在截面尺寸 $a \times b$ 的矩形波导中插入开槽膜片，膜片通波截面为 $a \times b'$ 且 $b' < b$ ，该膜片等效电路呈容性，称为容性膜片。本实验以容性膜片+匹配负载作为待测容性负载。

当传输线终端负载阻抗 $Z_L$ 等于传输线特征阻抗 $Z_0$ 时，系统实现阻抗匹配，传输线内为纯行波，此时传输效率最高、功率容量最大；若负载与传输线不匹配，会产生反射形成驻波，通常在负载与传输线之间接入阻抗调配元件实现匹配。本实验采用可滑动单销钉调配器，通过调节销钉插入深度与纵向位置，抵消容性负载的反射，使波导系统达到匹配状态。

本实验涉及的公式有：

1. 终端负载反射系数

$$\Gamma(0) = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = |\Gamma(0)|e^{j\psi(0)}$$

2. 由反射系数求负载阻抗

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma(0)}{1 - \Gamma(0)} (\Omega)$$

3. 驻波系数与反射系数幅值关系

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

4. 第一个波节点位置与反射相位关系 ( $\lambda_g$  单位 cm)

$$d_{\min 1} = \frac{\psi(0)\lambda_g}{4\pi} + \frac{\lambda_g}{4} (\text{cm})$$

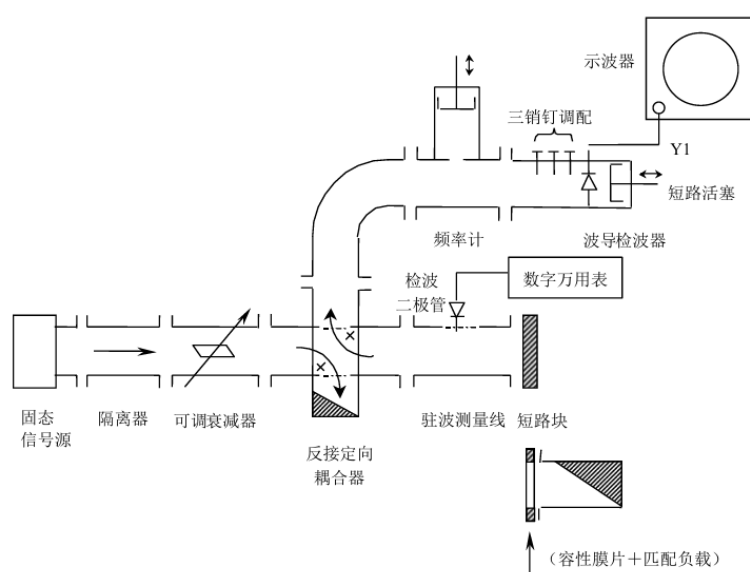
5.  $\text{TE}_{10}$  模波导波长理论计算公式 ( $\lambda$ 、 $a$  单位 cm)

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

实验所用矩形波导尺寸：宽边  $a = 2.286\text{cm}$ ，窄边  $b = 1.016\text{cm}$ 。

## 四、实验内容及结果

**(1) 建立实验装置：**把各部件连接成图所示测量系统。注意十字孔定向耦合器的连接方向，在本系统中定向耦合器连接方向为对反射功率采样。(定向耦合器从主波导耦合到副波导的功率传输规律是：功率传输方向通过两个耦合孔的连线拐弯，见图中标识)。实验开始前可调衰减器保持一定衰减量。驻波测量线探针插入深度为 0 驻波测量线输出电缆连接到高精度数字万用表输入口，万用表选择 AC 电压测最模式(测最检波信号的有效值)。波导检波器输出电缆接到示波器 CH1 输入口，并把示波器输入选择置于直流工作状态。



**(2) 工作频率 $f$ 的测量：**测量线开口端用短路块短接。接通固态微波信号源，选择方波调制。调节波导检波器中的短路活塞或三销钉调配器，使示波器上检波输出的方波幅度达到最大。若幅度不足，可调节可调衰减器：幅度偏小则减少衰减量，偏大则增加衰减量。注意：调节应细心，三销钉插入深度不得超过波导高度  $b$  的一半，否则会产生全反射导致无信号。用直读式频率计测量系统工作频率  $f$ ：缓慢细调频率计，同时观察示波器上方波幅度。当幅度发生突变并降至最小时，频率计读数即为微波信号源振荡频率（单位 GHz）。读数为两条水平红线夹持的刻度线与垂直红线相交处的数值。

**实验数据：**用直读式频率计测得系统工作频率  $f = 9.3825\text{GHz}$

**(3) 波导波长测量：**将测量线探针插入深度调至约 1 mm，细心调节检波调配装置，使数字万用表检波输出信号最大，实现检波匹配（注意探针不宜过深，以免引起反射误差，并确保检波二极管工作于平方率检波区）。沿波导横向移动探针至驻波波腹点（检波输出最大），此时调节衰减器使万用表读数恰为 0.500 mV，记录该衰减器刻度

以备后续使用。随后缓慢横向移动探针，依次记录相邻两个驻波波节点的位置刻度值  $d_{min1}$  和  $d_{min2}$ 。

**实验数据：** 探针测得相邻两个驻波波节点的位置记录如下：

| 测量数据   | $d_{min1}$ | $d_{min2}$ | $d_{min1} - d_{min2}$ |
|--------|------------|------------|-----------------------|
| 实测值/cm | 6.970      | 4.775      | 2.195                 |

由测量数据可以得到  $\lambda_g = 2(d_{min1} - d_{min2}) = 4.390cm$ 。

实测频率  $f = 9.3825GHz$ ，对应波长  $\lambda = \frac{c}{f} = 3.197cm$ ，

再利用公式  $\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1-(\frac{\lambda}{2a})^2}} = 4.473cm$ ，

计算可得实验误差为1.86%，说明实验测量准确，理论符合实际。

**(4) 容性膜片等效负载的测量：** 测量线开口端先接短路块，横向移动探针找到一个驻波波节点位置，记录为  $d_{min1}(\text{短})$ ，作为等效短路面位置；随后拆下短路块，换接容性膜片和匹配负载，从  $d_{min1}(\text{短})$ 位置向信号源方向移动探针，测得此时第一个驻波最小点位置  $d_{min1}(\text{膜片})$ 并记录。最后测量驻波系数，横向移动探针，在数字万用表上读取检波输出的最大值  $P_{max}$  和最小值  $P_{min}$ （注意检波器工作于小信号平方率检波区，万用表读数对应相对功率值）。

**实验数据：**

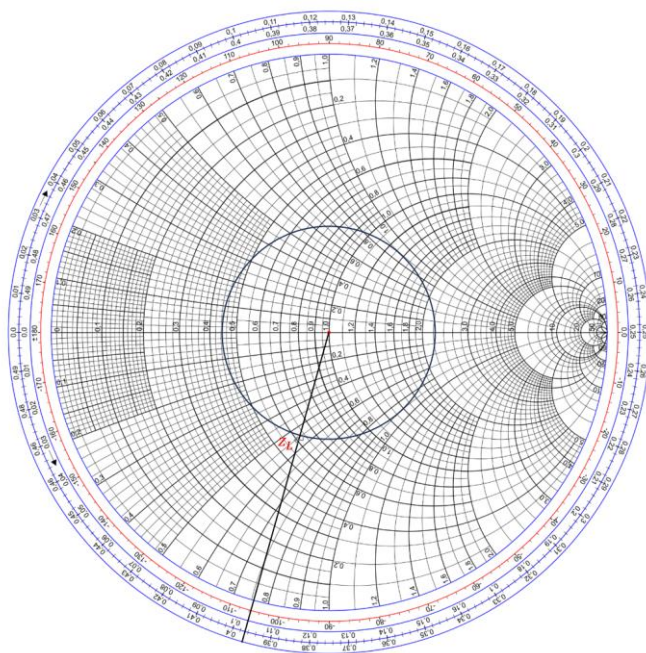
| 测量数据 | $d_{min1 \text{ 短}}$ | $d_{min1 \text{ 膜片}}$ | $P_{max}$ | $P_{min}$ |
|------|----------------------|-----------------------|-----------|-----------|
| 实测值  | 9.220cm              | 8.760cm               | 0.243mV   | 0.048mV   |

由功率数据可以得到：  $\rho = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} = \sqrt{\frac{P_{max}}{P_{min}}} = 2.25$ ，  $|\Gamma| = 0.385$

$\Delta d = d_{min1 \text{ 短}} - d_{min1 \text{ 膜片}} = 0.460cm$ ，  $\frac{\Delta d}{\lambda_g} = 0.103$

利用史密斯圆图可以读出容性膜片+匹配负载的归一化阻抗  $z_L = 0.63 - j0.55$

同时可以读出反射系数  $\Gamma = 0.385e^{-j106^\circ}$ 。



**(5) 阻抗匹配测量：**在测量线与容性膜片及匹配负载之间串接单销钉调配器（其销钉插入深度和纵向位置均可调）。先调节衰减器使示波器显示足够的方波信号，再细心调节销钉的横向位置和插入深度，使示波器信号最小（尽量接近零）；随后提高示波器灵敏度和输入功率，重复上述调节，直至在最高灵敏度与最大功率下信号仍为最小，即达到最佳匹配。之后适当增加衰减器衰减量，横向移动测量线，记录该输入功率下数字万用表的检波输出最大值  $P_{max}$ (匹配 1)与最小值  $P_{min}$ (匹配 2)，并计算驻波系数  $\rho$ 。最后拆去调配器，将负载端直接接匹配负载，同样测取  $P_{max}$ (匹配 2)和  $P_{min}$ (匹配 2)，计算此时驻波系数  $\rho$  匹配。

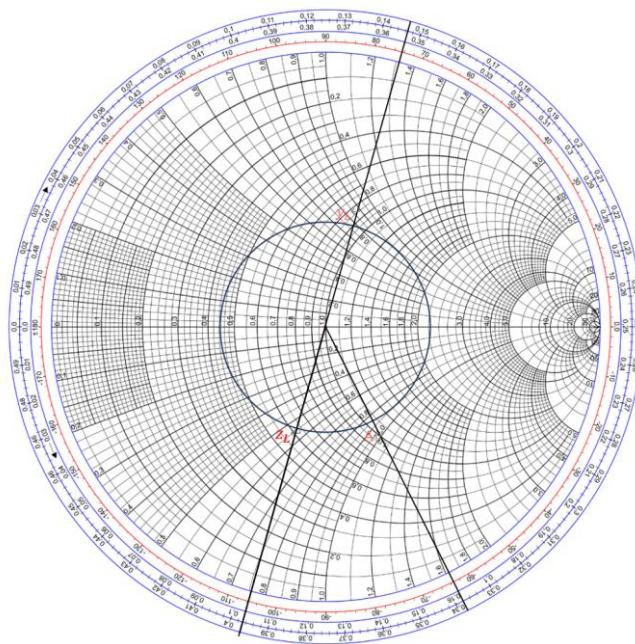
#### 实验数据：

| 负载端接法     | 单销钉调配器+容性膜片+匹配负载 | 匹配负载    |
|-----------|------------------|---------|
| $P_{max}$ | 0.850mV          | 0.792mV |
| $P_{min}$ | 0.669mV          | 0.749mV |

$$\text{单销钉调节匹配后的驻波系数 } \rho = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \sqrt{\frac{P_{\max}}{P_{\min}}} = 1.13$$

$$\text{负载端接匹配负载时的驻波系数 } \rho = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \sqrt{\frac{P_{\max}}{P_{\min}}} = 1.03$$

实验测得单销钉匹配器销钉到负载的长度  $l = 3.05\text{cm}$ ，前面实验测得  $\lambda_g = 4.390\text{cm}$ ，则  $l = 0.695\lambda_g$ ，利用史密斯圆图可以看到，当单销钉匹配器销钉到负载的长度为  $l$  时，A 点导纳近似落在  $g=1$  圆上，A 点读数为  $1.05 - j0.85$ ，因而通过调节销钉的插入深度，使得销钉所呈现的归一化电抗值为  $j0.85$ ，即可实现匹配。



## 五、思考题

**(1) 测量线开口端不接短路块，任意接一负载，能否测出波导波长，接短路块测波导波长有什么优点？**

任意负载下也能测出波导波长。因为传输线上相邻两个驻波波节点的间距始终为半个波导波长 ( $\lambda_g/2$ )，与终端负载无关。但若负载反射较弱，驻波起伏小，波节点不明显，定位误差大。接短路块时形成全反射（纯驻波），波节点尖锐，位置容易精确读取，测量准确度高；同时短路状态的波节点可作为等效短路面，为后续相位测量提供参考零点。

**(2) 测负载驻波相位为什么要先测  $d_{\min \text{短}}$  短？**

$d_{\min \text{短}}$  是终端短路时测量线上某一驻波波节点的位置，对应实际传输线的等效短路面。由于测量线结构和连接器的影响，物理短路面的真实位置难以直接确定，而  $d_{\min \text{短}}$  能够准确地标定这一等效参考面。在测负载时，以该参考面为基准，比较负载状态下第一个电压波节点  $d_{\min \text{膜片}}$  与  $d_{\min \text{短}}$  的相对移动，通过公式  $\phi = \frac{4\pi}{\lambda_g} (d_{\min 1}^{(\text{短})} - d_{\min 1}^{(\text{负载})})$ ，可求得负载反射系数的相位，消除系统误差。

**(3) 在单销钉调配器调配前，测量线探针为什么不能伸入到波导里面？**

探针伸入波导会引入附加反射，相当于在测量点并联一个电纳，改变原传输线的驻波分布，使测得的驻波系数和波节点位置偏离真实值。若调配前探针已插入，测量结果包含了探针影响，据此调节销钉无法正确抵消负载反射，难以达到最佳匹配。因

此调配前必须将探针退出或仅插入极浅，以保证测量的准确性。

**(4) 本实验用容性膜片作为负载，若改用感性膜片，驻波最小点位置会向信号源方向还是负载方向移动，为什么？**

会向负载方向移动。电容性膜片等效为并联电容，其归一化导纳  $y=1+jb$ ，反射系数相位为负（或容性导纳使波节点向信号源方向移动）；而电感感性膜片等效为并联电感， $y=1-jb$ ，反射系数相位为正。根据驻波相位关系，感性负载引起的第一个电压波节点相对于短路面将向负载方向移动，即位置更靠近负载端。

**(5) 单销钉调配器调节匹配时，为什么检波器输出指示越小，表示调配得越好？**

检波器通过定向耦合器采样反射功率。调节的目标是使负载与传输线匹配，反射波减至最小。调配越接近匹配，反射功率越小，定向耦合器输出至检波器的信号就越弱，示波器上方波幅度随之减小。因此指示越小，代表反射越小，调配效果越好。

**(6) 如果经销钉调配器调配后，测得驻波系数  $\rho = 1$ ，在单销钉调配器与负载之间是否是行波，单销钉调配器至信号源方向是否是行波，为什么？**

单销钉调配器与负载之间不是行波。因为容性膜片+匹配负载本身并未匹配，会在该段产生反射，形成驻波分布。调配器的作用是利用其本身产生的反射波，在调配器处与负载的反射波等幅反相抵消，从而使得调配器左侧（至信号源方向）的传输线上无反射。所以，调配器至信号源方向为行波状态（ $\rho=1$ ），而调配器至负载段仍存在驻波。

**(7) 隔离器在系统中起什么作用，去掉隔离器直接连接信号源与测量线，会对驻波测量与频率稳定度造成什么影响？**

隔离器是一种单向传输器件，正向衰减很小，反向隔离度大。其主要作用是阻挡负载反射功率倒灌进信号源，避免因负载变化引起信号源频率和输出功率的波动（频率牵引效应），保证频率和功率的稳定。若去掉隔离器，测量过程中探针移动、调配器调节等造成的反射变化会直接反馈到信号源，导致振荡频率漂移、功率不稳，使频率计读数不准，驻波测量重复性差，严重时甚至损坏信号源。



## 六、实验总结与心得体会

通过本次波导传输线负载特性测量与阻抗匹配实验，我对矩形波导 TE<sub>10</sub> 模的传输特性、驻波与行波的形成条件、阻抗匹配原理以及史密斯圆图的应用有了更直观的理解，同时也积累了不少微波实验的操作经验。

在理论方面，实验将抽象的传输线方程和波导色散特性转化为具体的测量与计算：亲手测出相邻波节点的距离并计算出波导波长，再与理论公式对比，既验证了 TE<sub>10</sub> 模波导波长的频率依赖性，也让我对“横向谐振”和“截止波长”的意义理解更深。特别是利用短路块获得纯驻波、从而精确定位等效短路面的做法，使我认识到参考面校准在微波测量中的必要性，这也是为什么必须先测  $d_{\min(\text{短})}$  才能准确推算出负载反射系数相位的根本原因。

在实验操作上，驻波测量线探针的调节和频率计的读数对细心程度要求极高。探针插入过深会引入附加反射造成波形失真，而频率计旋钮的微小调节就会引起示波器方波幅度的剧烈变化，这让我亲身感受到微波电路对阻抗不连续和频率扰动的敏感。用单销钉调配器实现匹配的过程，则进一步加深了我对“以反射抵消反射”这一匹配思想的认识：只有当销钉的位置和深度调节到使其电纳与负载的归一化电纳等值反号时，才能将整个组合的等效导纳拉回史密斯圆图中心，实现传输功率最大化。示波器上反射信号最小时，驻波系数也接近 1，验证了调配的优劣。

数据处理中，史密斯圆图的运用将阻抗、反射系数和驻波系数这些参数的关系直观地呈现出来，我体会到图解法在微波工程中的高效率，也学会了从实测的驻波系数和波节点偏移量出发，在圆图上确定负载阻抗和销钉电抗的完整流程。此外，对比有无隔离器时的波形稳定性，理解到隔离器对吸收反射波、稳定信号源频率的重要作用，这让我对微波系统级联有了更全面的认识。

总体来看，这次实验不仅让我巩固了波导传输线的基础理论，更锻炼了我通过分工协作、细致调试来解决问题的实践能力。我深刻认识到，在微波频段下，任何一个小的阻抗不连续或操作失误都会被放大，唯有严谨的实验态度、仔细的观察以及理论指导下的分析，才能获得可靠的结果。这些收获将为我后续学习微波网络、天线等课程奠定扎实的基础。