

浙江大學

本科生实验报告



课程 电磁场与电磁波实验

姓名

学号

专业 电子科学与技术

实验内容 波导传输线测量与阻抗匹配

实验三 波导传输线测量与阻抗匹配

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。

2. 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：

$$\vec{E}_t = \vec{e}(\vec{\rho}) U(z), \quad \vec{H}_t = \vec{h}(\vec{\rho}) I(z)$$

则 $U(z)$ 、 $I(z)$ 满足传输线方程：

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

式中：

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

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

$U(z)$ 、 $I(z)$ 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 TE₁₀ 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。

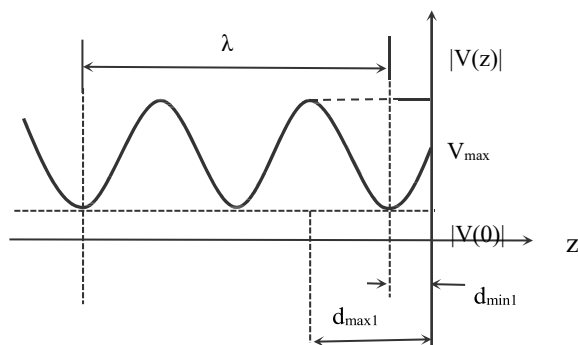


图 1 传输线上的电压沿线分布（驻波）

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 (U, I) ，入射波与反射波

(U^r, U^i) , 反射系数($\Gamma = |\Gamma|e^{j\varphi}$)、阻抗或导纳($Z = \frac{1}{Y}$), 驻波系数与驻波相位($\rho, \frac{d_{min1}}{\lambda_g}$)。这五组参数可以相互转换, 最常用的是反射系数, 在微波频率下它是一个便于测量的值。使用驻波测量线, $(\rho, \frac{d_{min1}}{\lambda_g})$ 也是一组便于测量的值

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 λ_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。

传输线与负载匹配时, 则传输线工作于行波状态(负载阻抗 Z_L 等于特征阻抗 Z_c), 此时传输线传输效率最高, 传输功率容量也最大。传输线与负载不匹配时, 一般在传输线与负载之间加一阻抗变换器来达到匹配, 使传输线工作于行波状态。本实验使用可滑动的单销钉调配器, 调节销钉的插入深度和横向位置使波导系统与负载(容性膜片+负载)达到匹配。

实验涉及的公式:

$$\begin{aligned}\Gamma(0) &= \frac{Z(0) - Z_c}{Z(0) + Z_c} = |\Gamma(0)|e^{j\varphi(0)} \\ Z(0) &= Z_c \frac{1 + \Gamma(0)}{1 - \Gamma(0)} \\ \rho &= \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{1 + |\Gamma(0)|}{1 - |\Gamma(0)|} \\ \tilde{d}_{min1} &= \frac{d_{min1}}{\lambda} \\ d_{min1} &= \frac{\varphi(0)\lambda_g}{4\pi} + \frac{\lambda_g}{4} \\ \lambda_g &= \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}\end{aligned}$$

式中 a 、 b 为矩形波导的宽边和窄边, 本实验中 $a = 2.286\text{cm}$, $b = 1.016\text{cm}$

3. 实验设备

固态微波信号源、隔离器、可调衰减器、频率计、定向耦合器、波导检波器、驻波测量线、容性膜片与匹配负载、短路块、数字万用表、示波器、屏蔽连接线

4. 实验内容

- (1) 根据实测值计算波导波长 λ_g
- (2) 计算实测频率下矩形波导 TE_{10} 模的波导波长 λ_g 的理论值, 并与实验测量值相比较。
- (3) 计算容性膜片+匹配负载时的驻波系数 ρ , 在史密斯圆图上读出容性膜片+匹配负载的反射系数 Γ 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。

5. 实验过程及数据记录

(1) 工作频率测量

测量线开口端用短路块短接，接通固态微波信号源，工作状态选择方波调制。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显示的检波输出（方波）幅度最大。调节直读式频率计，当方波幅度最小时，读数即为系统的工作频率。

测量结果为 $f = 9.3565\text{GHz}$ 。计算得光波长 $\lambda = 3.22\text{cm}$

(2) 波导波长测量

先调节测量线探针插入深度为 1mm 左右，再细心调节测量线上的检波调配装置，使数字万用表上指示的检波输出信号最大，即检波匹配。沿波导横向移动驻波测量探针，使探针位于驻波波腹点（检波的输出最大），此时再调节衰减器使数字万用表读数为 0.500mV （设定信号在合适的大小），记录此时衰减器的刻度，以便之后测量。此时的刻度为 9.243mm 。

慢慢地横向移动测量线探针，记下相邻两个驻波波节点的位置 $d_{\min 1}$ 、 $d_{\min 2}$ 的刻度值。

记录为：

$$d_{\min 1} = 5.935\text{cm} \quad d_{\min 2} = 8.145\text{cm}$$

故波导波长 $\lambda_g = 2(d_{\min 2} - d_{\min 1}) = 4.42\text{cm}$

通过理论计算，可得波导波长理论值 $\lambda_g = 4.53\text{cm}$ 。误差的可能原因是幅值为 0 的区间较大，移动探头的时候示数不断波动不利于判断是否稳定。

(3) 容性膜片等效负载的测量

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 $d_{\min 1(\text{短})}$ 并做记录（即等效短路面位置）。拆下短路块，接上容性膜片+匹配负载，从 $d_{\min 1(\text{短})}$ 的位置往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 $d_{\min 1(\text{膜片})}$ ，并做记录。

实验数据：

$$d_{\min 1(\text{短})} = 3.975\text{cm} \quad d_{\min 1(\text{膜片})} = 3.450\text{cm}$$

$$P_{\min} = 0.048\text{mV} \quad P_{\max} = 0.235\text{mV}$$

故驻波系数 $\rho = 4.9$ ， $|\Gamma| = 0.66$ ，归一化电长度 $\tilde{d} = 0.115$ 。通过史密斯圆图，得到 $\Gamma = 0.66e^{j(-97.2^\circ)}$ ，归一化阻抗 $z_L = (0.351 - 0.818j) \Omega$ ，如图 2 所示。

(4) 单销钉调配阻抗匹配测量

在测量线与容性膜片+匹配负载之间串接一只单销钉调配器。调节衰减器衰减量，使示波器有足够的方波信号显示。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

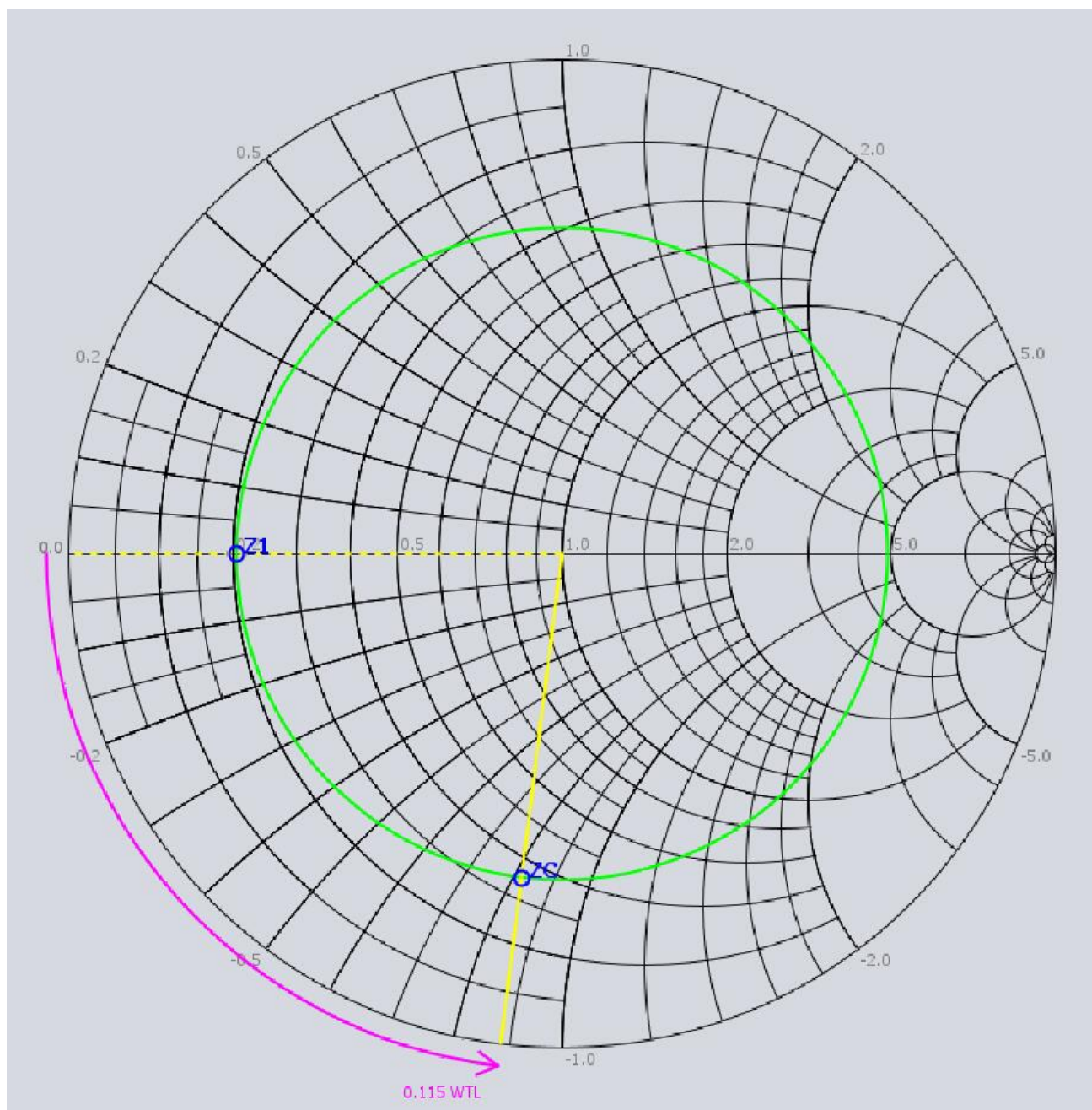


图 2 容性负载史密斯圆图求解

器上显示的信号最小（最好能到零）。进而提高示波器的灵敏度和增加输入功率，重复上一调节过程直到当示波器的灵敏度为最高和输入功率为最大且又在示波器上观察到的信号为最小为止，即找到最佳匹配位置。适当增加可调衰减器的衰减量之后，横向移动驻波测量线，记录该输入功率下数字万用表上的 $P_{max匹配}$ 与 $P_{min匹配}$ ，并计算此时的驻波系数 ρ 。测量得：

$$P_{max匹配} = 0.463mV \quad P_{min匹配} = 0.387mV$$

故驻波系数 $\rho = 1.19$ 。

量出单销钉调配器销钉到负载的长度 $d = 7.8cm$ ，对应归一化电长度 $\tilde{d} = 1.72$ 。由圆图可知

销钉的等效电纳为 $1.15j$ 。此时容性负载在销钉处的阻抗加上销钉的等效阻抗恰好使得销钉所在位置的驻波系数接近于 1，实现匹配。

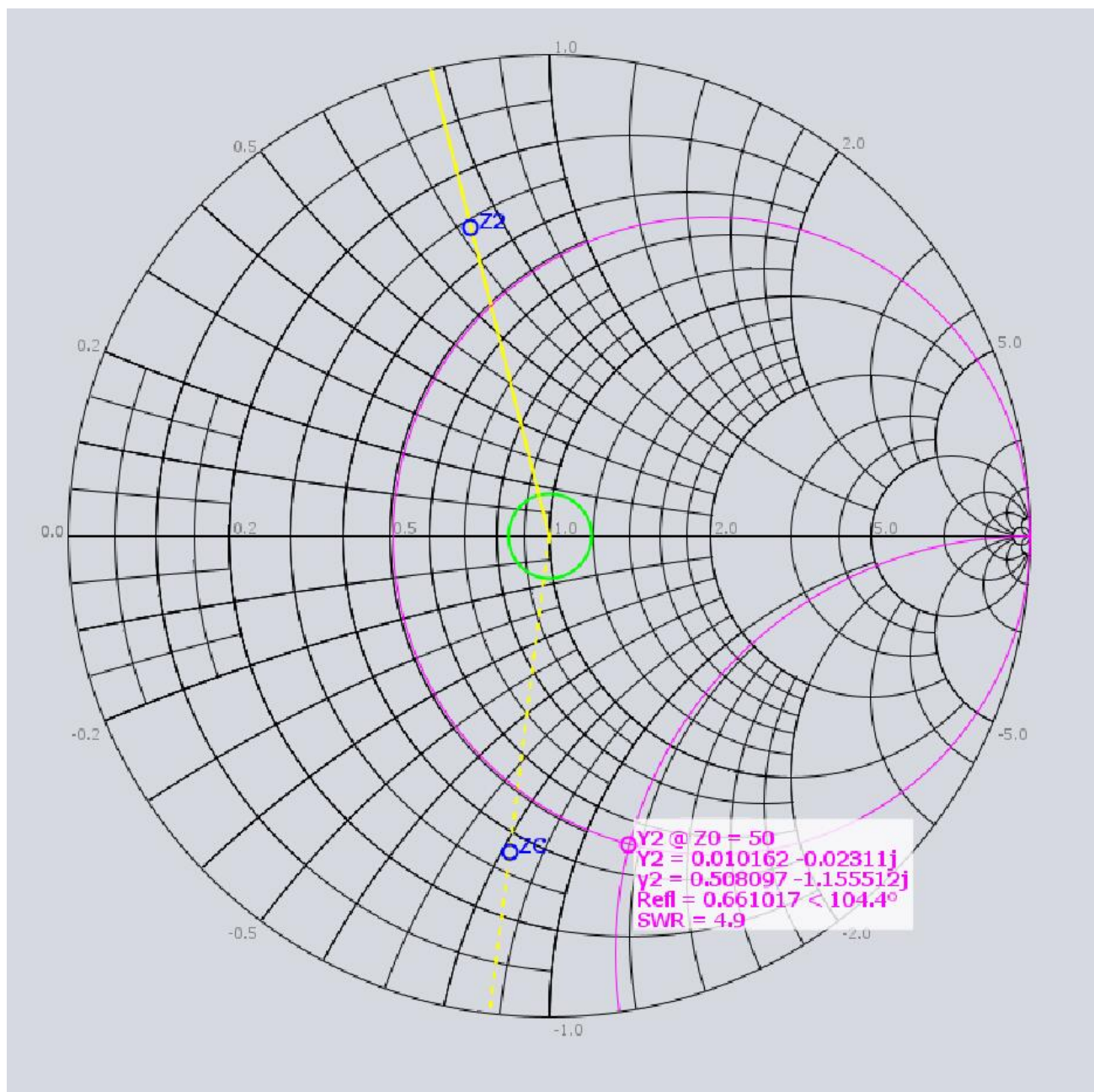


图 3 单销钉匹配史密斯圆图求解

6. 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？

能够测出波导波长，通过 Smith 原图变换，可以由任意负载推导处波导波长。用短路块时，在短路块处产生全反射，形成纯驻波，波节点处归一化电压为 0，现象明显，测量准确

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

驻波相位为驻波最小点和短路点间相位差，因此要测量短路点位置和驻波最小点的差

值。

- (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？
伸入波导不易于后续最佳匹配位置的寻找。
- (4) 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？
输出指示越小，则调配其与负载之间的波更趋近于行波，表示负载匹配状况良好。
- (5) 如果单销钉调配器调配后，测得驻波系数 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？
是行波。驻波系数代表输出最大值与最小值的比，值为 1 表示电压恒定。

7. 实验收获与体会

通过本次实验，我复习并巩固了理论课中波导传输特性这一章的知识，通过对波导器件及其工作参数的测量，深入理解了每一个公式和模型的物理含义。

8. 建议与意见

无