

波导管传输特性的测量

[实验目的]

1. 了解微波测试系统中各种有关微波常用设备的结构、原理和使用方法。
2. 掌握微波频率、功率及驻波比等基本参量测量的方法

[仪器和用具]

微波传输带，小信号功率计，信号源，选频放大器等。

[实验原理]

1. 微波及其特点。

微波是波长很短的电磁波，它的波长处在 1 米至 0.1 毫米之间，对应的频率在 300MHz 到 3000GHz 之间。通常，微波又分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波叫个波段。从电磁波谱图可以看出，频率低于 300MHz 的电磁波就是一般所指的无线电波(包括：超短波、短波、中波和长波)，频率高于 3000GHz 的电磁波是指：红外线、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线、宇宙射线等。微波较长波长部分与无线电波相接近，微波的较短波长部分则逐步向光学的方向过渡。

微波的应用包括作为信息载体和微波能应用两个方面。微波的传统应用是雷达和通信，这是微波作为信息载体的应用。微波能的工农业应用包括微波的强功率应用和弱功率应用方面。强功率应用是微波加热；弱功率应用是用于各种电量和非电量(包括长度、湿度、度、速度等)的测量。

不论是无线电波、微波还是光波、宇宙射线都是电磁波，但由于波长的不同，各具有其独到的特点，用途也大不相同。

微波的主要特点如下：

微波的波长短，微波的波长比起地球上一般物体的几何尺寸要小得多，或在同一数量级。一般地说，电磁波波长越短，其传播特性就越接近于几何光学。因此，当用微波照射物体时，它将会产生显著的反射；、波长越短方向性、分辨能力就越高。这就能够制成定向性极高的微波天线系统，用于接收微弱的微波信号，确定物体的方向、距离等特性。

微波的波长短，相应的振荡周期也就很小，约 10^{-9} 到 10^{-12} 秒。这个数量级的时间和普通电子管中电子自阴极到板极的飞行时间(10^{-9} 秒)在同一数量级或更短，因此，普通的栅控电子器件就无法在微波段中得到使用，代之原理上完全不同的微波电真空器件。采用电子束与微波场相互交换能量方式来进行的。

波长短，趋肤效应严重，辐射损耗随着波长的减短而越来越严重，因此在低频时所使用如元件，如电阻、电容、电感及其所组成的部件在微波段就不能适用，必须采用“分布参微量”元件。

微波的量子特征，根据量子特性，电磁辐射能量是不连续的，即 $E=hf$ ， h 是普朗克常数、 f 为辐射频率。 f 低量子特征不显著，微波的 f 较高，相应的能量子大约是 10^{-5} ~ 10^{-2} 电子伏特之间，这正好可以用来研究顺磁及铁磁材料。

研究微波特点，首先要建立起场的概念。

在微波系统中，“电压”、“电流”的概念已失去了确切的含义。必须从三维空间场的理论着手，应用麦克斯韦方程组，去求在一定的边界条件 F ，一定介质填充系统的电场方程解。

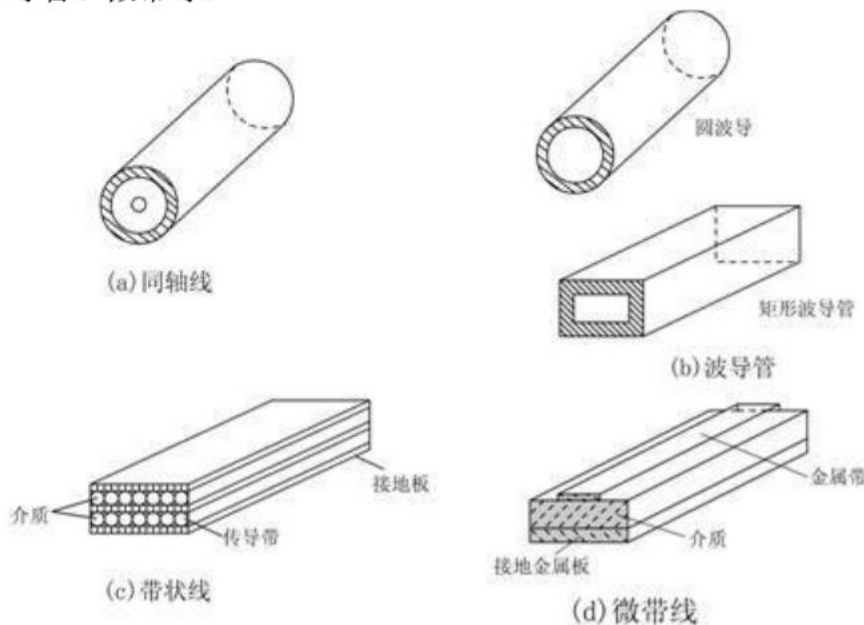
微波测量的量和测量技术是独特的。在低频无线电中我们常测电压、电流，频率；在微波系统中则是测量阻抗、波长与频率。阻抗的测量是通过测量电场强度的相对值，而功率的测量则是将微波所产生的热效应通过热电元件转换成电能后测量的。

2.微波振荡器。

微波振荡器件有许多种微波电量器件(如速调管、磁控管、行波管等)及微波固体振荡器件。

3. 微波传输线

在波长较长的无线电波传输中，一般只要使用两根导线来传输能量，但是波长短到两根导线之间的距离可以比拟时，被传输的电磁能量就可以通过导线辐射到周围空间去，故两根导线不能用来传输微波。因此，为了避免能量辐射损耗，可以将导线做成封闭式的，目前常用的微波传输线有同轴电缆、方向波导管、圆形波导管、微带等。



通过解波动方程，可以知道在同轴电缆或微带中传输的电磁波—横电磁波，简称 TEM 波，其特点是 $H_x=E_z=0$ ，即沿着传输 Z 方向电磁场没有分量，但电磁波沿空心波导管中传输横电磁波（简称 TE 或 H 波），其特点就是 $E_z=0, H_z \neq 0$ ，即电场只有横向分量而磁场则具有纵向分量，以及横磁波（简称 TM 波或者 E 波），其特点是 $E_z \neq 0, H_z = 0$ ，即磁场只有横向分量，而电场有纵向分量。

波导中传输的电磁波具有色散的特性，因此，有一定的“临界波长” λ_c 时，电磁波才能在波导中传输。对于举行波导临界波长 λ_c 由下式表示：

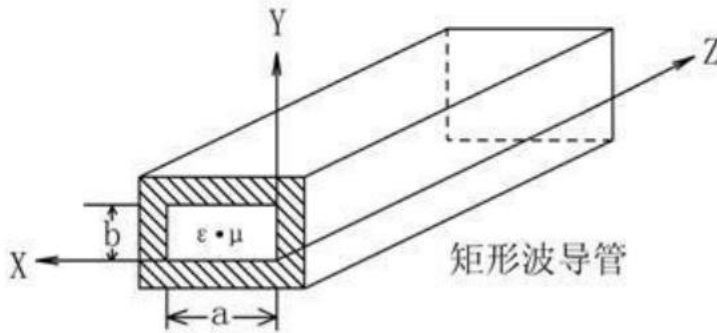
$$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}$$

其中 a 式举行波导款便尺寸，b 式波导窄边尺寸，m、n 是波动方城解的本征数，它可取 0, 1, 2, 3……整数。色散波在波导中的波导波长和自由空间的波长有如下关系。

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\frac{\lambda}{\lambda_c})^2}}$$

4. 矩形波导管中的 H_{10} 波;

在实际应用中，总是把波导管设计成只能传输单一波型。现在使用的标准矩形波导管中，都只能传播 TE_{10} 波（或 H_{10} 波）。



考虑一个横截面为 ab 的矩形波导管其管壁为理想导体，则管内沿着 Z 轴传播的 TE_{10} 波各个分量可以写成：

$$E_y = E_0 \sin \frac{\pi x}{a} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (1)$$

$$E_x = E_z = 0 \quad (2)$$

$$H_x = -\frac{\beta}{\omega \mu} E_0 \sin \frac{\pi x}{a} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (3)$$

$$H_y = 0 \quad (4)$$

$$H_z = -\frac{\beta}{\omega \mu} E_0 \sin \frac{\pi x}{a} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (5)$$

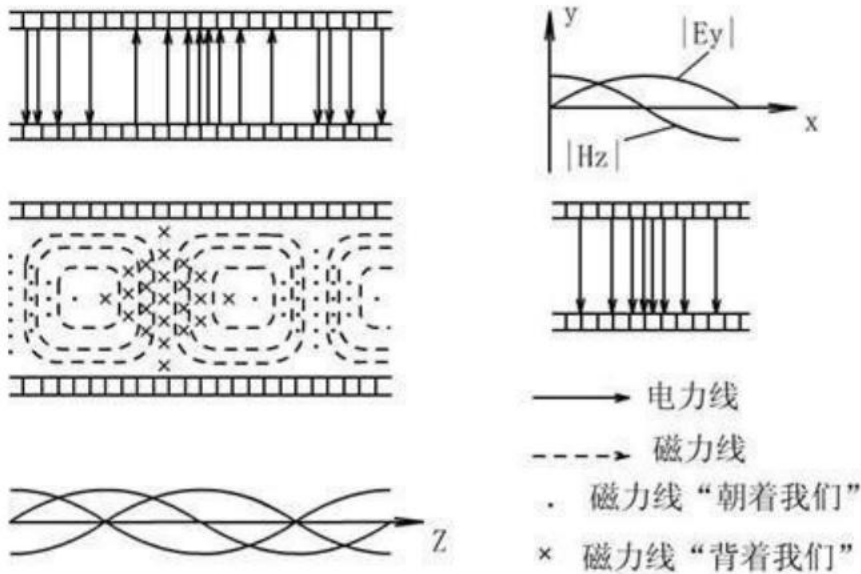
其中，相位常数 $\beta = 2\pi / \lambda_g$,

波导波长 $\lambda_g = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_c)^2}$,

临界波长 $\lambda_c = 2a$,

自由空间波长 $\lambda = c/f$ 。

$\lambda_c = 2a$ 称为波形的截止波长，只有波长 $\lambda < \lambda_c$ 的电磁波才能在波导管中传播。电场矢量垂直于波导宽臂 (E_y)，而磁场矢量在平行于波导宽臂的平面内 (H_x , H_z)。电磁场在 x 方向形成一个半驻波，而沿 y 方向是均匀的。电磁场振幅随 x 、 y 的分布如图所示。



从上面的分析可以看出“TE₁₀”波的含义。TE₁₀波的“TE”表明电场没有纵向分量，即 $E_z=0$ ；TE₁₀波的第一个脚标“1”表明场沿波导的宽边方向有“一”个最大值，或者说有一个半驻波；第二个脚标“0”表明场沿波导窄边方向没有变化。

4. 反射系数、驻波比、波导管的工作状态。

波导管的终端一般接有晶体检波器或其他负载。当入射的电磁波没有全部被负载吸收，即所谓不匹配时，就有一部分波被反射。波导中的任何不均匀性也会产生反射波。一般说来，波导中同时存在着入射波 E_i 与反射波 E_r ， E_i 与 E_r 会产生干涉，形成驻波。为描述驻波，引入反射系数与驻波比的概念。

波导中某截面处的电场反射波与入射波之比称为反射系数。亦即：

$$\Gamma = \frac{E_r e^{-j\beta z}}{E_i e^{j\beta z}} = \frac{E_r}{E_i} e^{-2j\beta z} = \Gamma_0 e^{-2j\beta z} \quad (6)$$

$$\text{其中，} \Gamma_0 = |\Gamma_0| e^{j\varphi} \quad (7)$$

Γ_0 是终端的反射系数， φ 是在终端反射波与入射波的位相差。

驻波比 ρ 定义为：

$$\rho = \frac{|E_y|_{\max}}{|E_y|_{\min}} \quad (8)$$

Γ 与 ρ 有如下关系：

$$\rho = \frac{1+|\Gamma_0|}{1-|\Gamma_0|} \quad (9)$$

当然也可以用驻波比 ρ 来表示反射系数 $|\Gamma_0|$ ：

$$|\Gamma_0| = \frac{\rho-1}{\rho+1} \quad (10)$$

由式(9)、(10)可以看出： $\rho \geq 1$ ， $|\Gamma_0| \leq 1$ 。

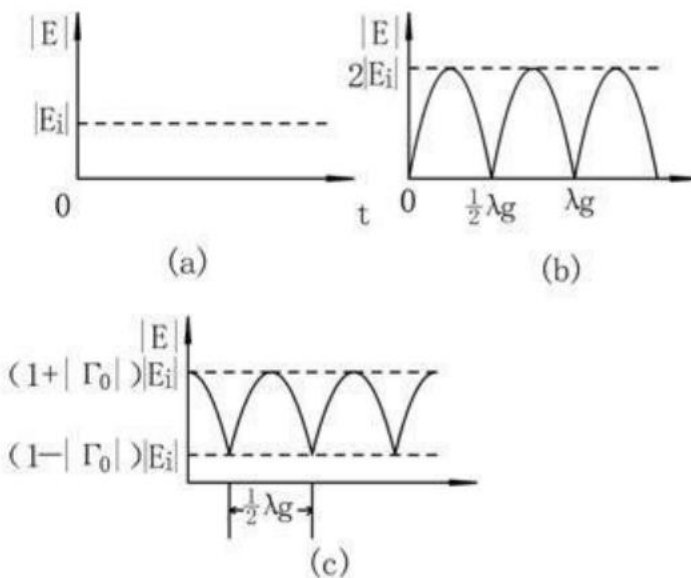
当微波功率全部为终端负载所吸收时（这种负载称为“匹配负载”），波导中不存在反射波。 $|\Gamma_0|=0$, $\rho=1$, 传播的是行波

当波导终端是理想导体板时（微波技术中叫“终端短路”）形成全反射，因在终端处 $E_y=0$, $E_i=-E_r$ 。此时 $|\Gamma_0|=1$, $\rho\rightarrow\infty$, 于是

$$|E_y|=2|E_i|\sin\beta^l \quad (11)$$

这时波导中形成纯驻波。在驻波波节处 $|E_y|_{\min}=0$, 驻波波腹处 $|E_y|_{\max}=2|E_i|$ 。这种状态称为纯驻波状态。一般情况下，波导中传播的不是单纯的行波和驻波，于是 $|\Gamma_0|<1$, $\rho>1$ 。场分布是一个行波和一个驻波的叠加，称为行驻状态。

下图给出波导在上述三种状态下电场随 l 而变化的分布曲线。



6. 常见波导元件

a. 驻波测量线: 是用来测量驻波比的仪器，它是在标准的波导管中开一微槽，在微槽中插入一根可以调节插入深度、可以沿波导移动的探针。移用探针移动来测波导中不同位置的电磁场，不同位置的电磁场由探针来检取，微波检波二极管检波后加在指示器上，这就可以判读处不同位置的电场相对强度。探针的位置可以由附在测量起上的标尺读得。

b. 吸收式频率计（详细请见实验步骤）

c. 微波负载是承受微波功率的统称，可以是晶体检波装置、微波功率计探头、吸收片、微波天线等。

[实验步骤]

一、 频率和波长的测量。

1. 电磁波的频率和波长可以用它在媒质中的传播速度联系起来：

$$f\lambda = V \quad (V \text{ 近似为光速, 通常取 } V=3 \times 10^{10} \text{ 厘米/秒})$$

沿 Z 轴方向传播 TE₁₀ 波的各个分量为

$$\begin{cases} E_y = E_0 \sin\left(\frac{\pi}{a} X\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \\ E_x = E_z = 0 \\ H_x = -\frac{\beta}{\omega\mu} E_0 \sin\left(\frac{\pi}{a} X\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \\ H_z = j \frac{\pi}{\omega\mu^2 a} E_0 \cos\left(\frac{\pi}{a} X\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \\ H_y = 0 \end{cases}$$

其中，相位常数 $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}$

$$\begin{aligned} \text{波导波长 } \lambda_g &= \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \\ \text{临界波长 } \lambda_c &= \frac{c}{f} \end{aligned}$$

所以 $\lambda_g > \lambda_0$

为了使波导内只传播 TE₁₀ 波，波导截面尺寸应满足

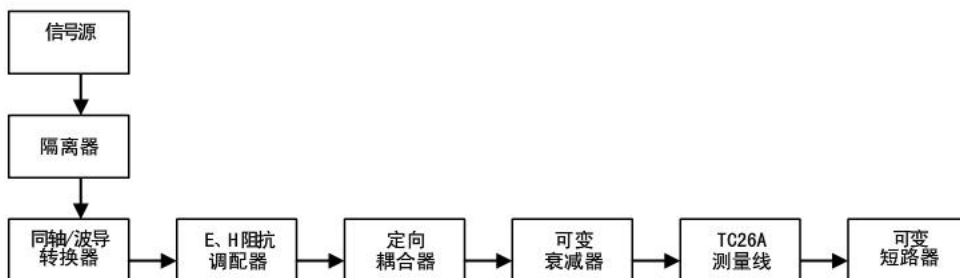
$$\frac{\lambda}{2} < a < \lambda, 0 < b < \frac{\lambda}{2}$$

一般取 $a \approx 0.7\lambda$ $b \approx 0.3 \sim 0.5\lambda$

目前，我国通常取 $a = 22.86\text{mm}, b = 10.16\text{mm}$

其主模频率范围为 8.20~12.50GHz，截止频率为 6.557GHz。

2. 实验连接如图所示



连接好实验系统。打开信号发生器 YM1123 (调零)，信号源信号的工作方式置于“方波”，重复频率×10 档 1000Hz 左右，将信号源调到所需要的输出频率。YM3892 选频放大器的衰减置于 50dB，输入阻抗置于 200Ω，通频带置于 32Hz，。将选频放大器增益、频率置于中间。

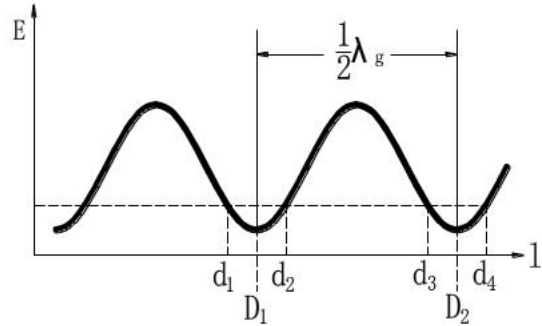
3. 波长的测量。(测量线读数法)

a. 打开信号源，调节输出电平及频率、方波内调制、重复频率为 1kHz 左右，TC26

测量线的输出端口可以接上短路片，来回移动探针的位置，观察选频放大器的指示情况。一旦选频放大器有指示，改变信号源的重复频率以及 YM3892 的频率微调，使二者的频率一致，并且调到指示最大。

b. 移动测量线探针，同时适当调整选频放大器的放大倍数和增益避免在最大输出位置时使选频放大器的表头指针打表。来回移动测量线的探针，观传输在终端短路情况下全反射的驻波分布情况。

c. 用“平均法”找出两个相邻的最小点位置 D_1 和 D_2 ，即：移动探针在驻波最小点左右找出两个具有相同幅度(由选频放大器读出)的位置 d_1 和 d_2 ，然后取其平均值、即为所需的最小点位置 D_1 ，用相同的方法找出相邻的最小点 D_2 ，如图所示：



d. 求出最小点位置 D_1 和 D_2 (D_1 和 D_2 的位置在波导测量线可通过附件千分表读出)

$$D_1 = \frac{d_1 + d_2}{2} \dots\dots\dots D_2 = \frac{d_3 + d_4}{2}$$

相邻两个最小点的距离即为半个波导波长 $\lambda_g = 2|D_1 - D_2|$

e. 注意：

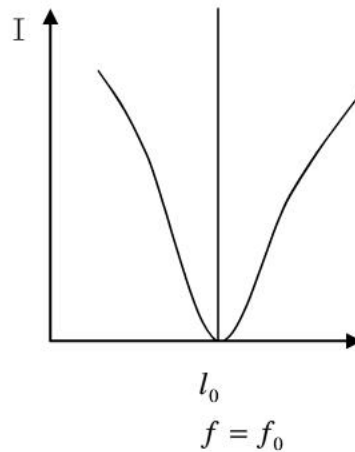
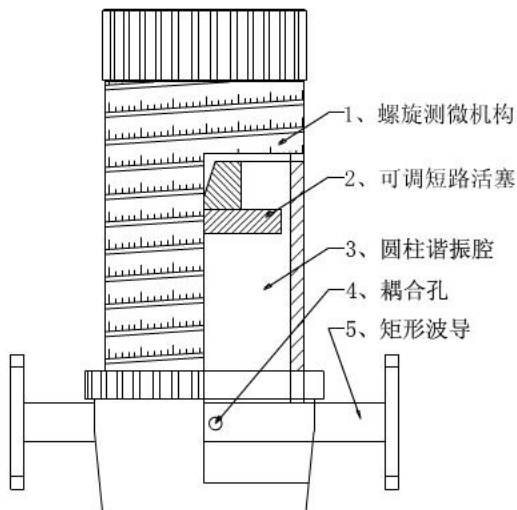
- ①调节信号源输出功率，调节太大有时候会处于过耦状态。输出的大小牵引到频率的偏移是正常的。
- ②每次改变信号源频率时，都要重新调节 E-H 面阻抗调配器、晶体检波器、测量线使之处于谐振输出的最大状态。
- ③选频放大器使用时应当注意随时调节增益，防止输出太大打坏表头且方便测量

4. 功率的测量。

打开数字小功率计，调零。将 N8 功率波导探头接到 TC26 测量线的输出端，选择合适量程，仔细调节 E-H 阻抗调配器使之指示最大。

5. 频率的测量：

吸收式频率计，其结构如图所示。当传输线中相当一部分功率进入频率计谐振腔内，而另一部分从耦合元件处反射回去，在谐振时，腔中场很强，反射回去也强。使之频率计的输出在谐振时明显减小

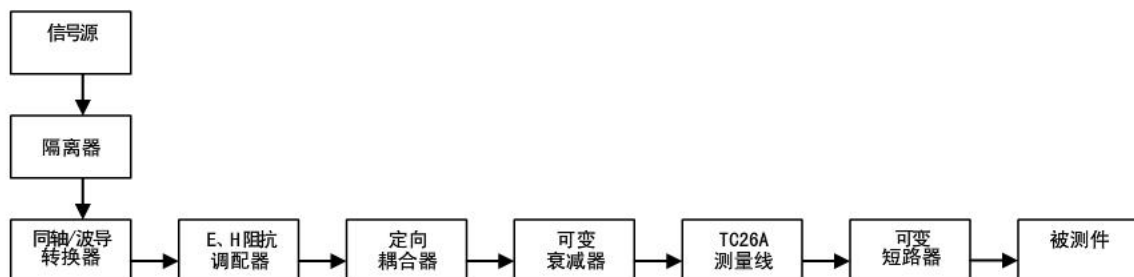


例如，将信号源的频率调节到 10GHz 左右。用选频放大器或示波器来测量的话，信号源需要放在内方波，并且方波的重复频率必须是 1000Hz 左右。当有指示时，慢慢旋转频率计在 10GHz 附近转动。当转动到输出幅度明显降低，在降低到最低的频率时，就是所测信号源的频率。由于频率计的测量精度是小于 0.3%，所以这种测量的精度是很高的。

6. 驻波比的测量（调制频率法）。

传输线中的主播可同传输线的特性阻抗、传输设备的阻抗和终端负载之间的相互作用联系起来，对驻波的解释可得传输线或终端器的参量性质，因而它可同传递到负载的净功率联系起来。

驻波比分为：小驻波比 ($1.05 < \rho < 1.5$) 中驻波比 ($1.5 < \rho < 5$) 大驻波比 ($\rho > 5$)



- 将信号源的频率调节调到需要测量驻波比频率的点上, 连接选频放大器。
- 仔细调节 TC26 测量线的调谐活塞, 使得探针达到最大的灵敏度, 测量线探针深度一般为 1.5mm 深度。
- 调节 E-H 面阻抗调配器, 使得系统的驻波最小。
- 反复调节信号源输出的方波重复频率与选频放大器的选频一致, 使之指示最大。
- 连接匹配负载, 移动探针支座, 测出传输线终端负载的驻波图案, 记下读数。同时细调 E-H 面阻抗调配器使之最大的和最小的读数驻波比最小。将最大读数置于满刻度 1, 最小读数就是驻波系数。
- 系统调试完毕, 用被测件替下匹配负载, 就可以测量驻波系数了。
- 大驻波比的测量。