

十一、微波实验

预备知识

微波是波长最短的无线电波。无线电波可按其波长范围或频率范围进行分类 波长范围约 1 米 ~1 毫米 即频率为 300 兆赫 ~300 千兆赫的无线电波称为微波。

微波技术是第二次世界大战期间，由于雷达的需要而发展起来的一门电子技术。它已在通讯、原子能技术、空间技术、量子电子学以及工农业生产等许多部门都得到了广泛的应用，并深入到医疗卫生和日常生活。如家用微波炉已进入了人们的家庭，成为烹调的得力工具。

在实际工作中，将微波中最常用的波段分别称为 L, S, C, ... 波段 其划分如下：

波段代号	频率范围(GHz)	标称波长(cm)
L	1.0~2.0	22
S	2.0~4.0	10
C	4.0~8.0	5
X	8.0~12.5	3
K	18.0~27.0	1.25
Q	27.0~40.0	0.8

其中 X 波段的微波测量系统是一般实验室中所常见的。微波中常用的频率单位吉赫用 GHz 表示 即 $1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$ 。

微波测量与低频无线电测量相比具有独白的特点，所用的测量方法和仪器也有所不同。在低频电路中，常用电压、电流、频率作为基本量，阻抗、功率等均用电压、电流的关系式推得。可是，在微波电路中，由于它是分布参数电路，电压、电流失去了明确的意义，必须用场的概念进行讨论。在微

波测量中 以驻波、波长 (频率) 功率作为三个基本测量 通过驻波的测量不仅可以测出电磁波在传输线中传播时场强的相对大小, 而且可以测量传输线的阻抗、衰减、相移等参量 传输线中的波长是根据电磁场的驻波分布 由测量线直接测得的。

1. 微波的波导传输

广义而言, 波导是指能够引导电磁波沿一定方向传输能量的传输线。在微波波段, 随着工作频率的升高, 由于导线的趋肤效应和辐射效应增大, 使得普通的双导线不能完全传输微波能量, 常用的微波传输线有平行双线、同轴线、带状线、微带线、金属波导管及介质波导等多种形式的传输线。

(1) 波导管中的 TE_{10} 型波

波导管是一种空心金属管 其截面形状有圆形、矩形、椭圆形等 用得最多的是矩形波导管, 简称波导, 见图

11.0-1.

根据电磁场的普遍规律——麦克斯韦方程组或由它导出的波动方程——及具体波导的边界条件, 严格求解得出矩形波导中不能传输 TEM 波, 只能传输 TE 波 (横电波) 和 TM 波 (横磁波)。

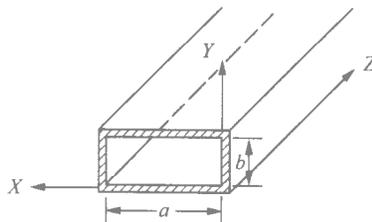


图 11.0-1

TE 波的电矢量只有横向分量, 而磁矢量的横向和纵向分量都有; TM 波的磁矢量只有横向分量, 而电矢量的纵向、横向两个分量都有。在实际应用中, 一般让波导中存在一类波型 而且只传其中一种波型 例如 TE_{10} 波就是矩形波导中常用的一种波型。

考虑一个截面为 $a \times b$ 的矩形波导 (见图 11.0-1) 其管壁为理想导体, 则沿 z 方向传播的 TE_{10} 型波的各个场分量为:

$$\left. \begin{aligned} E_y &= E_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \\ E_x &= E_z = 0 \\ H_x &= -\frac{\beta}{\omega\mu} E_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \\ H_z &= j \frac{\pi}{a} E_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \\ H_y &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (11.0-1)$$

式中 ω 为角频率, $\omega = \beta\sqrt{\mu\epsilon}$; β 为相位常数, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}$; λ_g 为波导波长:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (11.0-2)$$

其中 $\lambda_c = 2a$, 称为波导截止波长。因此, 波导中只能传播 $\lambda < \lambda_c$ 的电磁波, λ 是自由空间电磁波的波长。

波导内 TE_{10} 波电场和磁场的分布即所谓场结构, 可用图 11.0-2 表示:

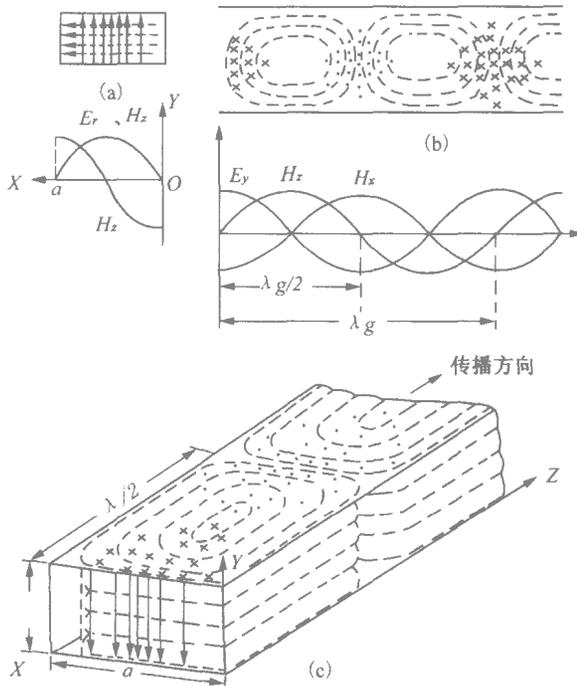


图 11.0-2 矩形波导 TE_{10} 波的场结构及其场分量与坐标的关系

图(a)说明电矢量只位于 XY 平面内(在 $Z=0$ 处, 上为负, 下为正)起止于上下两个宽边, 宽边中间电场最强, 两侧减弱, 呈正弦分布。它的磁力线在宽边相平行的平面内形成闭合线如图(b)并表明 E_y 、 H_x 和 H_z 在 Z 方向各有 $\frac{\pi}{2}$ 的相位差。图(c)表示 TE_{10} 型波场结构的空分布。

当电磁波在波导中传输时, 其高频电磁场将在波导壁上产生高频感应电流且分布在波导的内表面, 如图 11.0-3 所示。

波型 TE_{10} 的脚标“1”表示电场沿宽边是一个半驻波分布，“0”表示电磁场沿窄壁均匀分布。

(2) 波导管的工作状态

波导的终端一般接有晶体检波器或其它负载。当入射的电磁波没有被负载全部吸收，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。一般来说，波导中同时存在着入射波 E 与反射波 E_r ， E_i 与 E_r 会发生干涉，形成驻波。为描述驻波，引入反射系数与驻波比的概念，反射系数 Γ 定义为：

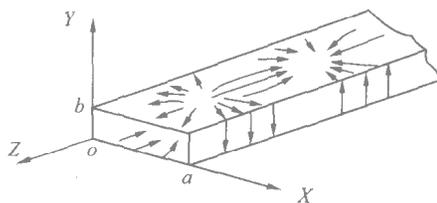


图 11.0-3 波导壁电流的分布

$$\Gamma = E_r/E_i = |\Gamma| e^{j\phi}$$

ϕ 为 E_i 与 E_r 的相位差。驻波比 ρ 的定义为：

$$\rho = |E_{\max}| / |E_{\min}|$$

Γ 与 ρ 的关系为：

$$\rho = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}, \quad |\Gamma| = \frac{\rho-1}{\rho+1} \quad (11.0-3)$$

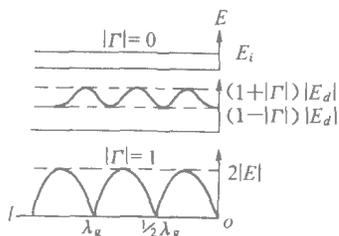


图 11.0-4 波导内三种不同 $|\Gamma|$ 时电场随 l 的变化
(以终端作坐标原点)

当波导终端接的是匹配负载时， $E_r = 0$ ，故 $|\Gamma| = 0$ ， $\rho = 1$ ，此时波导内是行波。波导终端用金属板短路时，由边界条件 $E_y = 0$ ，得 $E_r = -E$ 即产生全反射，这时 $|\Gamma| = 1$ ， $\rho \rightarrow \infty$ 。称纯驻波状态。一般情况下，负载吸收部分入射波，产生部分反射波，于是 $0 < |\Gamma| < 1$ ， $1 < \rho < \infty$ ，场分布是一个行波和一个驻波的叠加，称为混合波状态。图 11.0-4 表示波导内三种 $|\Gamma|$ 情况下的电场。

(3) 谐振腔

谐振腔是微波谐振系统，当它和入射电磁波谐振时，在腔内建立起确定波型的场分布，因此它与低频的 LC 谐振回路相似。谐振腔的主要参数为谐振频率 f_0 与品质因数 Q 。常用的谐振腔有：

① TE_{101} 矩形腔是长度 l 为 $\lambda_g/2$ 的矩形波导管，两端用导体板封闭，在一个端面上开一小孔，用以耦合入射波。根据场方程及边界条件，腔内正中

央电场最强，四周围绕着闭合的磁力线，它的谐振频率 f_0 为：

$$f_0 = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{l}\right)^2} \quad (11.0-4)$$

其中 l 为矩形波导的长度， c 为光速。该腔的品质因数 Q 值达 7 000 以上。

TE₀₁₁ 圆柱腔是长度 l 为 $\lambda_g/2$ 的圆波导管，两端用导体板封闭，同样在一端面要开耦合孔，其场结构如图 11.0-5 所示，它的最大特点是腔壁只有周围方向的电流，品质因数很高，可达 5×10^5 以上，其谐振频率为：

$$f_0 = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{1}{l^2} + \frac{1.49}{R^2}} \quad (11.0-5)$$

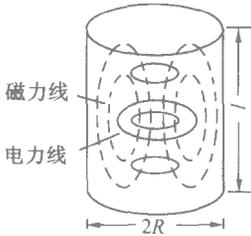


图 11.0-5 TE₀₁₁ 圆柱腔

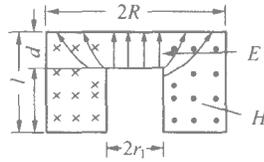


图 11.0-6 环行腔

环行腔。环行腔如图 11.0-6 所示，这种腔的电力线集中在中间凸出处，好像是一个集中电容，磁力线是围绕电场的，它在腔的环行圈内。它的波型是 TE₀₁₀，这种腔主要用在速调管中，中间凸出部分实际上是栅网结构，电子流可从这里通过，实现电子与电场之间能量的交换。

(4) 波导元件

可变衰减器。如图 11.0-7(a)，把一片能吸收微波能量的介质片垂直于矩形波导的宽边，纵向插入波导管即成，用以部分地衰减传输功率，沿着宽边移动吸收片可改变衰减量的大小，即为可变衰减器。

匹配负载。如图 11.0-7(b)，波导中装有很好地吸收微波能量的介质片或吸波材料，它几乎能全部吸收入射功率。

隔离器。图 11.0-7(c) 它是一种铁氧体器件对微波具有单向传输的特性。

晶体检波器。图 11.0-7(d)，从波导宽壁中点耦合出两宽壁间的感应电压，经微波二极管进行检波，调节其短路活塞位置，可使检波管处于驻波的波腹点，以获得最高的检波效率。

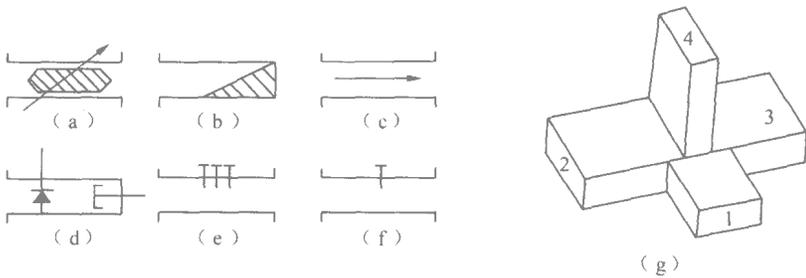


图 11.0-7 波导元件

⑤ 螺钉调配器。图 11.0-7(e)(f)，从波导宽壁中心插入 1 个或几个螺钉，调节其深度或位置，可改变由它引入的电抗，使电路达到匹配。

⑥ 双 T 接头。图 11.0-7(g)，它有四个臂，从 1 臂输入的功率只等分给 2、3 两臂，且相位相同，4 臂无输出，即 1、4 隔离，同理，4 臂输入功率从 2、3 两臂等分反相输出，4、1 两臂隔离。它是互易器件，为此从 2、3 臂同时输入等幅同相的波，则从 1 臂输出，称和臂，同时从 2、3 臂输入等幅反相波，则从 4 臂输出，称差臂，臂 1、4 始终隔离。由于这些特性使它在微波测量中获得了广泛的应用。

表 11.0-1 常用国产波导管的规格

型 号	频率范围 GHz	内截面尺寸(mm)		波段名称
		a	b	
BJ-35	2.60~3.95	72.14	34.04	10 cm
BJ-48	3.94~5.99	47.55	22.15	5 cm
BJ-84	6.57~9.99	28.50	12.60	3 cm
BJ-100	8.20~12.40	22.86	10.16	
BJ-140	11.90~18.0	15.80	7.90	2 cm
BJ-220	17.6~26.7	10.67	4.32	1.25 cm
BJ-320	26.4~40.0	7.112	3.556	8 mm
BJ-550	39.2~59.6	4.775	2.388	6 mm
BJ-740	60.5~91.9	3.099	1.549	4 mm

一般实验室所用的 3 厘米波导测试系统为 BJ-100 型，也称小三厘米波导测试系统。

实验 11.1 反射速调管工作特性、波导管 工作状态研究

引言

在无线电波工作频率不断提高时，电子管或晶体管的极间电容，引线电感的影响都十分显著，电子和离子的惯性即渡越时间效应变得不可忽视，这样就限制了频率的提高。微波电子管在微波技术的发展过程中，发挥了重要作用，虽然微波晶体管和固态源的研究工作进展很快，但目前在微波通信、微波雷达等微波技术中还大量应用着微波电子管。特别是功率较大、频率较高的电子管、微波晶体管还不能替代。速调管是微波电子管中的一大类。

速调管又分两类：一类为多腔式大功率和中功率速调管；另一类为单腔式速调管，称为反射式速调管。它是低功率管，一般在毫瓦级，个别可达一瓦以上，工作波长在厘米波和毫米波波段。

参考资料

- [1] 唐汉 微波原理 ,p. 1, p. 78, 1990。
- [2] 杨详林等, 微波器件原理 ,p. 43, 1985.
- [3] 武国机, 微波器件与电路 ,p. 96, 1985 .

实验目的

1. 熟悉微波测试系统，了解反射速调管振荡的基本原理。
2. 掌握速调管源三种工作方式的正确使用，观察和测量反射速调管的工作特性曲线。
3. 掌握驻波、波长和频率的测量方法。

实验原理

1. 反射速调管工作原理

在速调管中，首先对电子流进行速度调制，然后进行密度调制，群聚了的电子与输出腔隙缝的高频电磁场进行能量交换，将直流电源的能量转换为高频振荡的微波能量。反射速调管的结构如图 11.1-1 所示，它有三个电极：① 阴极 发射电子；② 谐振腔，它相对于阴极处于正电位，称为阳极，用以加速电子；电子通过中心的栅网部分时与腔内电场发生相互作用，腔内微波通过耦合环输出；③ 反射极，它相对于阴极为负电位，用以反射电子。

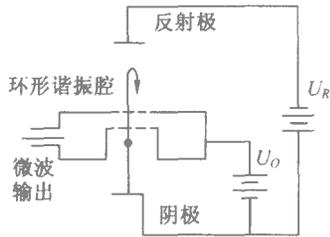


图 11.1-1 反射速调管结构原理图

(1) 速度调制——电子流与场的相互作用。从阴极发射的电子，经过阳极栅网时，受谐振腔交变电场的作用，电子在交变电场的正半周内受到加速，电场能转变为电子的动能；在负半周内，电子受到减速，动能转变为电场能，栅网上的交变电压对电子流进行了速度调制。

(2) 密度调制——电子流群聚。在反射空间里，速度大的电子需要较长的时间飞越较长的距离才返回栅网；速度小的电子返回到栅网所需时间少，飞越距离短。选择适当的反射极电压，可使速度不等的电子同时返回到栅网 形成电子群聚 如图 11.1-2 所示。显然电子群聚中心是在栅网交变电压为零瞬间出发的电子，它的渡越时间为

$$\tau = \frac{4D\sqrt{m_e U_0/2e}}{U_0 + U_R} \quad (11.1-1)$$

式中 U_0 为谐振腔电压， U_R 为反射极电压， D 为反射极与栅网间的距离。

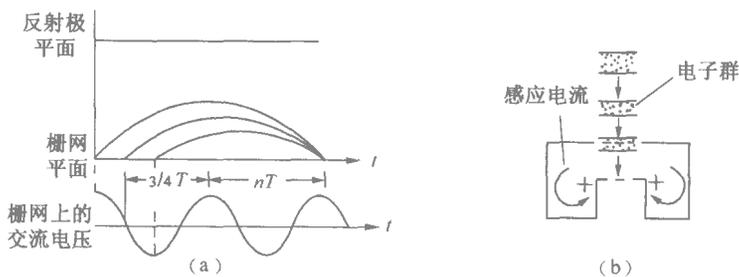


图 11.1-2 电子的群聚过程

若要使群聚的电子把最大的能量传递给谐振腔的微波场，电子群应该被栅网上交变电压所减速。条件是电子的渡越时间应等于 $3/4$ 个振荡周

期，即极大能量激励的条件是：

$$\tau = (n + 3/4)T, n = 0, 1, 3, \dots \quad (11.1-2)$$

上式说明适当调节 V_O 和 V_R 使电子群返回到谐振腔时受到微波场的最大减速，微波场从电子束获得最大能量，于是谐振腔的微波场将逐步增强，并能给出一定的输出功率。

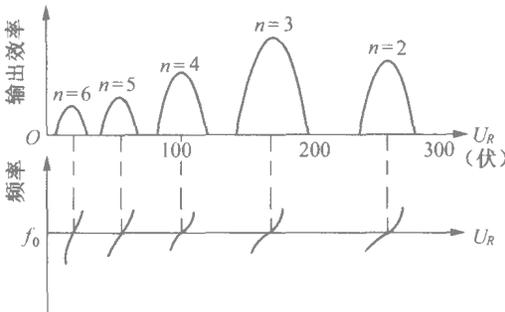


图 11.1-3 反射速调管的输出特性

最大，振荡频率就是谐振腔的固有频率 f_0 ，不同模的输出特性也不同，其中输出最大的模称为最佳振荡模。

可以看出，反射速调管振荡频率的调节有两种方法：即机械调谐和电子调谐。机械调谐是改变谐振腔的体积，即调节谐振腔的固有频率 f_0 ；电子调谐是改变反射极电压 U_R ，使频率在 $f_0 \pm \Delta f/2$ 的范围内变化，一般电子调谐的范围 $\Delta f/f_0$ 为 $0.3\% \sim 0.5\%$ 。

3. 工作状态

反射速调管有三种工作状态，即连续振荡、方波（矩形波）调幅和锯齿波（或正弦波）调频。在反射极上只加直流负电压时，速调管工作在连续振荡状态，调节负电压可使速调管工作于某个振荡模。当工作于最佳振荡模时，它的功率输出最大，频率也较稳定。

当反射极上除了直流电压 U_R 外再加上方波电压时，即得方波调幅输出，如图 11.1-4 所

2. 输出特性

如上所述，在谐振腔电压一定时，反射极电压只有取某些特定值时，速调管才会振荡，它们对应于 (11.1-2) 式中不同的 n 值，称为振荡模。在每个模内，输出功率与振荡频率都将随 U_R 而改变，如图 11.1-3 所示，在模中心，输出功率

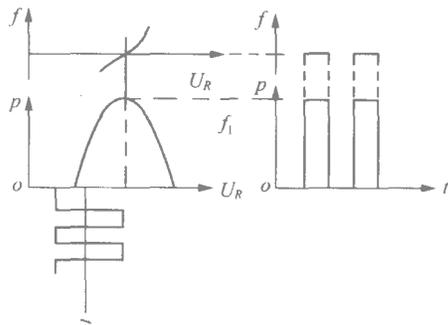


图 11.1-4 方波调幅

表 11.1-1 X 波段反射速调管性能

型 号	K-19	K-27	K-103	K-108	K-129A
输出功率(mW)	≥ 20	≥ 10	≥ 50	≥ 100	≥ 23
频率范围(GHz)	9.17~9.53	8.5~9.7	8.7~9.2	8.2~12.4	9.1~9.7
电子调谐范围(MHz)	≥ 28	≥ 28	≥ 15	≥ 30	≥ 30
电子调谐率(MHz/V)	≤ 3	≤ 3	≥ 0.5		
灯丝电压(V)	5.8~6.9	5.8~6.8	6.0~6.6	6.0~6.6	6.0~6.6
灯丝电流(A)	0.45~0.55	0.45~0.55	≤ 0.85	≤ 0.7	
谐振腔电压(V)	+300~330	+300~330	+300	+500~520	+300
谐振腔电流(mA)	15~32	15~32	≤ 60	≤ 65	
反射极电压(V)	-(20~300)	-(75~200)	-(20~300)	-(100~600)	-(100~250)
输出方式	同轴线	同轴线	波 导	波 导	波 导

示，调节方波幅度及反射极电压，使方波顶部调在振荡模的中心点上，方波底部处在模外以获得纯粹的调幅状态。

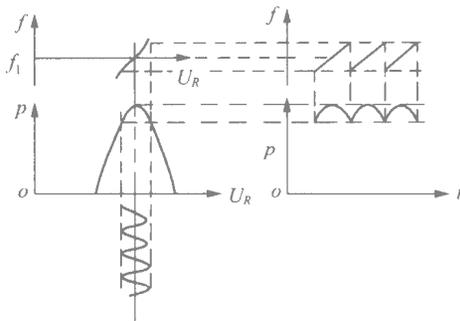


图 11.1-5 锯齿波调频

图 11.1-5 是用锯齿波实现调频工作状态。将反射极电压 U_R 选在振荡模中心，这时的振荡频率为 f_0 ，如果锯齿波幅度比振荡模区域小得多时，可以得到近似线性的调频，而寄生的幅度变化（调幅）很小。

表 11.1-1 是常用 X 波段的反射速调管性能，我们实验室常用的三厘米反射速调管是 K-19 和 K-108 型，其性能参数见表 11.1-1。

实验仪器

三厘米波段的速调管及其电源、常用波导元件、微波测量线、波长计、示波器和测量放大器。

微波测量线是测量波导中微波电场分布的精密仪器。它的结构是一段在宽边中心线上开槽的波导管和可沿槽线滑动的探针（图 11.1-6）。探针从波导中耦合出小量微波功率，通过二极管检波就给出沿波导各点的电场分布。

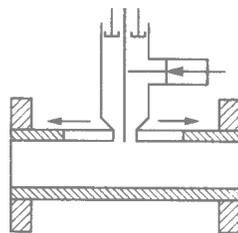


图 11.1-6 波导测量线

测量线探针的插入深度是可以调节的。插得过深会影响波导内的场分布，增加测量误差；插得太浅，耦合的能量太少，检波电流很小，影响测量精度，一般取插入深度为 $1 \sim 1.5 \text{ mm}$ 合适。

为了使探头耦合到的能量有效地传输给检波二极管，常将探针作为同轴线的中心导体，同轴线的端点装有调节活塞，使它成为一个同轴谐振腔。调节活塞位置，可使检波输出最大，也使它对波导中场分布的影响最小。在进行调谐时，对探针点的位置要正确选择，一般是将测量线终端短接，形成纯驻波场，移动探针置于波腹点，然后调节活塞使检波电流达到最大值。

波长计或频率计是一高 Q 值谐振腔。腔长可用活塞改变，即改变其谐振频率，活塞的位置可从测微计上读出，因此，可在校正曲线上找到对应

的频率数值。但也有将频率直接刻度在测微计的外圆筒上的“直读”式波长计即称频率计，它使用方便，但误差稍大。

波长计与波导系统的连接有传输型和吸收型两种。传输型具有输入与输出两个窗的谐振腔，当输入的微波与谐振腔谐振时，能量传输最大。吸收式波长计只有一个耦合元件与波导系统相耦合，当微波频率与它谐振时，输出指示为一极小值。

检测微波的传输功率使用功率计。但是在微波功率很小的情况下，晶体检波器可用作功率的相对指示。实验证明，当检波电流小于 $10 \mu\text{A}$ 时，晶体检波器具有平方律检波特性，即

$$I = KP \quad (11.1-3)$$

检波电流正比于微波功率。为了在小信号检波时有较大的输出指示，可以在检波之后加一级直流放大器，或者在微波信号具有幅度调制时使用测量放大器作为指示器。

实验内容

本实验所用的基本微波电路如图 11.1-7 所示。

1. 波导匹配状态的调节

调匹配是微波测试中必不可少的调整步骤。当波导系统处于匹配状态时，由信号向负载传输功率而无反射出现（即 $\rho = 1$ 的行波状态）。调节步骤是：打开速调管电源并调节反射极电压，使速调管在某个模上正常工作，然后反复调节检波器前的调配器，同时移动测量线，检测波导内各点

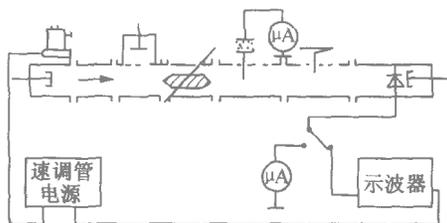


图 11.1-7

电场分布。根据驻波比 ρ 的定义，必须把极大点 $|E_{\max}|$ 调小，或把极小点 $|E_{\min}|$ 调大，反复进行多次，最后达到 $\rho \approx 1$ 的匹配状态。

2. 速调管工作特性研究

(1) 振荡模和中心频率的观测。用动态和静态两种方法。动态法是用速调管电源锯齿波电压输出接于示波器的 x 轴，将晶体检波器的输出接示波器的 y 轴，调反射极电压从 280 V 慢慢降至 20 V ，振荡模曲线在示波器上显示出来。若扫描幅度很大，可以观察到多个振荡模，适当减小锯齿波幅

度并调节反射极直流电压，则可得到某一振荡模。调节波长计，模曲线上出现吸峰，将吸收峰移到曲线顶点，读波长计上的刻度即得中心频率。静态测量法：将速调管源工作置于连续波状态，用直流 μA 表接于检波器的输出端，逐点改变反射极的电压 U_R 记录 U_R 和电流值 最后画出 $P \sim U_R$ 的关系曲线。

(2) 电子调谐率的测量归结为对微波频率的测量，也有静态与动态两种方法。静态法是对某个模进行逐点测量功率曲线 $P(U_R)$ 的同时，测出各点对应的频率 f 作出 $f \sim U_R$ 曲线，找出 $P(U_R)$ 曲线的两个半功率点间的频率差 Δf 即得电子调频宽度。最后可算出中心频率附近的电子调谐率 $K = (\Delta f / \Delta U_R)_{f_0}$ 。

动态法测量时使用双线示波器，用其中一个通道显示功率曲线 $P(U_R)$ ，调节频率计，使其谐振频率落在 $P(U_R)$ 曲线上，这时曲线上将出现一个吸收峰。改变衰减器的衰减量，使输入功率降为原功率的一半，用频率计在两个半功率点上的吸收峰测得电子调谐宽度 Δf 的值。见图 11.1-8(a)。从另一通道输入反射极扫描电压，再将频率计依次调在 f_0 附近的两侧 f_1 与 f_2 量出与 f_1 、 f_2 对应的锯齿波幅值 ΔU_R ，即得电子调谐率 $K = (f_2 - f_1) / \Delta U_R$ 图 11.1-8(b)。

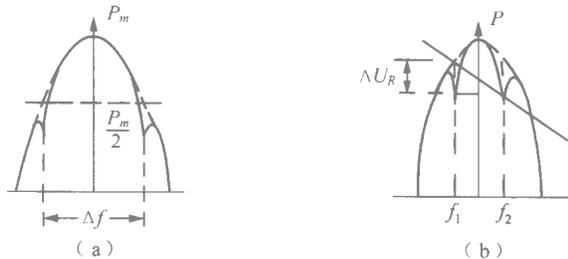


图 11.1-8

3. 波导驻波测量

速调管源工作置于方波，用测放大器做指示器，调匹配器测几个小于 6 的驻波比。移动测量线探针位置，测出电场强度 E_{\max} 与 E_{\min} 点上的检波电流 I_{\max} 和 I_{\min} 按小信号平方律检波 即可算出驻波比 ρ

$$\rho = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} = \sqrt{\frac{V_{\max}}{V_{\min}}} \quad (11.1-4)$$

用这种方法可以测量 $\rho = 1.02 \sim 6$ 范围内的驻波比。

用金属板将测量线的输出端短接，可得纯驻波状态（参见图 11.1-9），这时的驻波比较大，波节与波腹的位置比较明显，而相邻波节（或波腹）间的距离为 $\lambda_g/2$ 因而在测量驻波比的同时可以测量波导波长 λ_g 。由于驻波比大，检波电流 I_{\max} 与 I_{\min} 相差太大，在波节点上检波电流极微，在波腹点上二极管检波特性远离平方律，故不能用式 11.1-4 来计算驻波比 ρ 。可用“二倍最小功率法”来测量，此方法只测量电场强度极小点附近的分布规律，而避免测量极大值。其方法是先测出极小点的检波电流 I_{\min} ，再测量极小点两侧检波电流为 $2I_{\min}$ 时的距离 d （见图 11.1-9）则

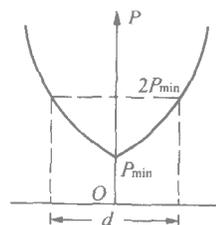


图 11.1-9 二倍最小功率法测驻波比

$$\rho = \sqrt{2 - \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda_g}\right)} / \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda_g}\right) \quad (11.1-5)$$

当 $\rho \gg 1$ 时， $\lambda_g \gg d$ 上式可近似为

$$\rho \approx \lambda_g / \pi d \quad (11.1-6)$$

当 ρ 很小时，波导接近于行波工作状态。

这时的驻波测量可采用别的比较复杂的特殊方法，这里不再介绍。

最后，测量大驻波时的工作频率 f ，用(11.0-2) 公式求出 λ_g 与测量所得的 λ_g 比较，并求其误差。

注意事项

1. 测速调管特性时，反射极电压 U_R 是高压，接插时特别要注意安全。
2. 调节速调管源反射极电压时，注意不要超过 300 V 以保护速调管，延长其工作寿命。
3. 用波长计测量频率时，要缓慢转动才能找到极尖锐的吸收峰，测完后必须调离谐振点，方能进行其他测量。

预习思考题

1. 怎样利用示波器观察反射速调管振荡模？测试系统如何连接？
2. 如何在示波器上寻找振荡模的中心频率？各振荡模的中心频率为什么相等？

3. 测量大驻波比时，如何正确测量 d 值？
4. 怎样调节测量线？如何正确使用测量放大器？

实验问答题

1. 为什么可以在波导的宽壁中心上开槽放置测量线的探针？
2. 改变反射式速调管的工作频率有几种方法？有什么区别？
3. 你认为测量 λ_g 时，测那两点之间的距离比较精确？为什么？
4. 波长计（或频率计）测量微波频率的原理是什么？

（盛玉宝）

实验 11.2 微波衰减测量

引言

在微波传输系统中，插入某些微波元件或器件，如波导、弯头、衰减器、隔离器、滤波器等，由于它们本身的反射和损耗，使回路所传输的功率电平发生变化，衰减量就是用衡量插入元件对传输功率电平影响的一项重要技术指标。微波发射接收系统对衰减量的要求很严格，尤其是卫星接收站所检测到的信号特别微弱，对于为这种系统所制造的任何器件，都必须进行精密的衰减测量。

测量微波衰减的方法很多，随着科学技术的发展，对小衰减和大衰减的测量提出了许多新的精密测量方法，如微波网络分析法，双通道零值法，穿梭脉冲法，超导环约瑟夫逊法等。这里我们仅介绍最基本的衰减测量方法，也是实验室和工厂中最常用的方法。

铁磁性半导体——铁氧体在微波段的应用极为广泛，采用铁氧体构成各种微波器件，有一级近似下的线性器件如微波开关、调幅器、调相器、双工器等，有非线性铁氧体器件如倍频器、变频器及参量放大器等。按照器件的传输性能是可逆与不可逆又分为互易器件与非互易器件，一般微波测量系统中用得最多的铁氧体器件是二端口隔离器和三端口环行器，它们属于非互易器件。本实验即是测量这两种器件的性能。

参考资料

[1] F. L. 沃纳, (IEE 专题丛书第 19 卷, 1977 年《微波衰减测量》宋孟宗等译, 1982 年)

[2] 周清一, 微波测量技术, p. 149, 1964。

[3] 向仁生, 微波铁氧体线性器件原理, p. 72, 1979。

实验目的

1. 了解网络衰减的定义。
2. 熟悉与掌握微波衰减测量的基本方法——平方律检波法和高频替代法。
3. 了解铁氧体隔离器和环行器的性能, 测量其传输损耗和隔离衰减。

实验原理

根据微波网络理论, 一个二端口微波器件都可以看作为一个二端口网络如图 11.2-1 所示, 二端口器件以分贝表示的衰减 A 定义如下: 在一个对电源方向和负载方向都匹配 ($|\Gamma_R| = 0$ 、 $|\Gamma_L| = 0$) 的无反射系统中, 在插入指定元件前, 负载上吸收的净功率为 P_0 。见图 11.2-2, 插入器件后负载上吸收到的净功率为 P_2 则定义衰减 A 为

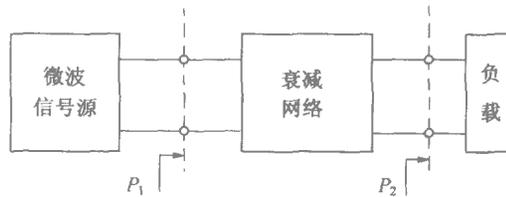


图 11.2-1 衰减器网络图

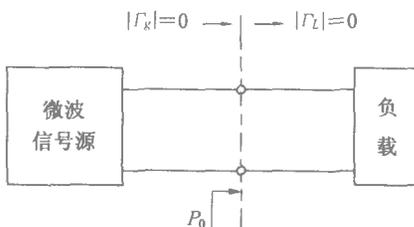


图 11.2-2 待测件插入前系统匹配示意图

$$A = 10 \lg \frac{P_0}{P_2} \quad (11.2-1)$$

在实际测量中往往不能保证 $|\Gamma_R| = |\Gamma_L| = 0$, 由于传输线失配 $|\Gamma_R| \neq 0$ 或 $|\Gamma_L| \neq 0$ 引起的误差称为失配误差。

1. 平方律检波法。当晶体检波器具有平方律的检波特性时，测量放大器的指示值是和输入到检波器的功率成正比关系的，在这种情况下，可以直接根据测量放大器的指示值来确定由于衰减器件接入处引起的相对功率改变量，并按式 (11.2-1) 计算出它的衰减量。

2. 高频替代法。它是应用标准可变衰减器作为待测器件的替代标准。由于这种方法避免了晶体检波律的影响，可测 $\leq 30 \sim 40$ dB 的衰减量 其精度主要取决于标准可变衰减器的校准精度。

3. 铁氧体隔离器。它对正向通过的电磁波能量损耗很小，而对反向传输的波衰减很大，即电磁波几乎不能通过，它具有单向传输特性，在微波测量系统中，常用它接在微波振荡源之后，隔离反射波对信号源牵引，使源工作稳定。此外 由于它能衰减反射波 在要求不很高时 可以作为匹配器 在精密测量中有很重要的作用。

隔离器的结构如图 11.2-3 所示，在一段矩形波导中放入铁氧体片。波导外面有一“U”形永久磁铁，供给铁氧体片以恒定磁场。隔离器的损耗为：

$$\alpha_+ = 10 \lg \left(\frac{P_0}{P_+} \right) (\text{dB}) \quad (11.2-2)$$

$$\alpha_- = 10 \lg \left(\frac{P_0}{P_-} \right) (\text{dB}) \quad (11.2-3)$$

一般要求 $\alpha_+ < 0.5$ dB, $\alpha_- > 20$ dB ，对隔离器的输入驻波比要求小于 1.1 以下。

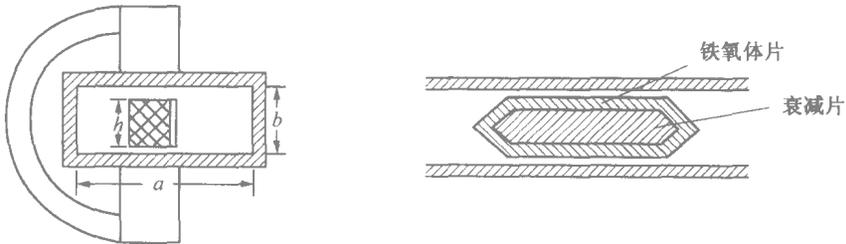


图 11.2-3 铁氧体隔离器结构

4. 环行器。它是使微波能量按一定顺序传输的铁氧体器件。图 11.2-4 所示的是波导三端口环行器，主要结构为波导 Y 形接头，在接头中心放一块圆柱形铁氧体（或三角形铁氧体块），在接头外面有 U 形永久磁铁 它提供恒定磁场 H_0 。当能量从 1 端口输入时 只能从 2 端口输出 3 端口隔离 同样 当能量从 2 端口输入时只有 3 端口输出，1 端口无输出 以此

类推即得能量传输方向为 1→2→3→1 的单向环行。

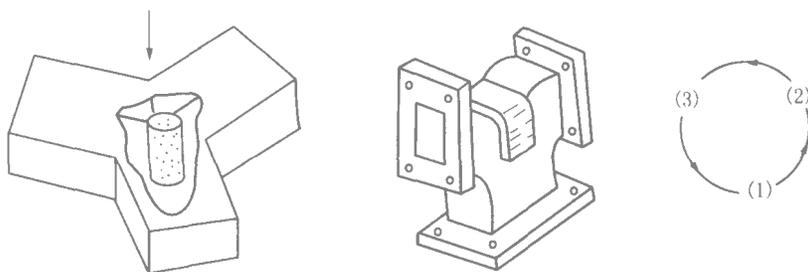


图 11.2-4 环行器结构

环行器的应用十分广泛，它可以作为雷达天线转换开关，起双工器的作用，如图 11.2-5 所示，发射机的能量从环行器 1 端口输入，2 端口输出到天线向外辐射；天线接收到的回波信号由 2 端口输入到 3 端口输出进入接收机，发射机与接收机相互隔离，同一天线就起到发射和接收的双重作用。它在微波通信中可作分频器，在微波测量中常作隔离器之用。

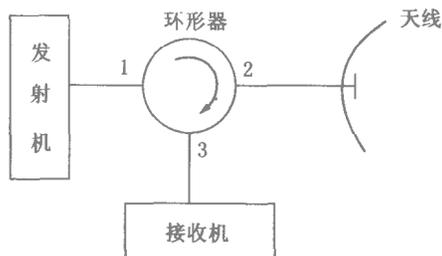


图 11.2-5 用铁氧体环行器作天线开关

环行器的主要指标为：

$$\alpha_+ = 10\lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right) (\text{dB}) \quad (11.2-4)$$

$$\alpha_- = 10\lg\left(\frac{P_1}{P_3}\right) (\text{dB}) \quad (11.2-5)$$

其中 P_1 为 1 端口输入的功率， P_2 、 P_3 为 2 端口和 3 端口输出功率。要求 α_+ 愈小愈好，一般为 0.3~0.5 dB， α_- 愈大愈好，一般大于 20 dB。

输入驻波比为 2、3 端口均接以匹配负载时，1 端的输入驻波比，一般要求小于 1.1。

工作带宽：为满足上述技术要求的频率范围。

实验仪器

本实验所用仪器同实验 11.1 微波测试系统如图 11.2-6 所示。

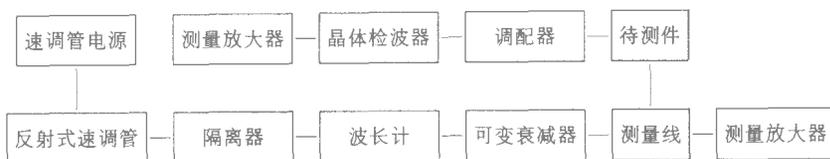


图 11.2-6 微波测试系统方框示意图

可变衰减器：它是在矩形波导中，沿传输方向插入一片吸收微波能量的介质，当吸收片置于波导宽壁 $\frac{a}{2}$ 的位置时衰减量最大，因为这里电场最强，吸收能量最大。移动衰减片可改变衰减量。

实验内容

1. 隔离器性能测量

按图 11.2-6 的波导系统已接好，不接待测件，将调配器与晶体检波器相连（在实验过程中不分开），直接接于测量线输出端，调节反射速调管源，工作选择为“方波”调制，调谐测量线，调配检波器，先调检波器的短路活塞，使晶体检波器输出到测量放大器上的指示达到最大，然后调匹配螺钉，反复调节使驻波比小于 1.05。用波长计测系统工作频率 f_0 ，将衰减器刻度置于 m_0 （查校正曲线得衰减量 A_0 ），记下这时检波器测得功率在放大器上的指示 α_0 。在平方律检波下 α_0 正比于 P_0 。

将隔离器正向接入，测其正向损耗，记下接入器件后放大器的指示 α_+ ，调节衰减器使放大器指示从 α_+ 增加到 α_0 ，记下这时衰减器刻度 m_+ ，查校正曲线得衰减量 A_+ ，则直接法和替代法测得的正向损耗分别为：

$$\alpha_+ = 10\lg\left(\frac{P_0}{P_+}\right) = 10\lg\left(\frac{\alpha_0}{\alpha_+}\right) \quad (\text{dB})$$

$$\alpha_+ = A_0 - A_+ \quad (\text{dB})$$

用测量线测隔离器正向输入驻波比 ρ_0 。

将隔离器反向接入，衰减器调在适当衰减 A_- 对应的刻度 m_- 上，这时晶体检波器输出到放大器上的读数 α_- ， α_- 正比于 P_- 。去掉隔离器，仍将检波器接于测量线输出端，测得无隔离器时系统输出功率在放大器上的指示 α_1 ，改变衰减器从 m_- 调到 m_1 ，使放大器指示从 α_1 降到 α_- （即隔离器反向接入时测得的 α_- 值），由 m_1 查曲线得衰减 A_1 ，则直接法和替代法测得隔离器的反向隔离衰减分别为：

$$\alpha_- = 10\lg\left(\frac{P_1}{P_-}\right) = 10\lg\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_-}\right) \quad (\text{dB})$$

$$\alpha_- = A_1 - A_- \quad (\text{dB})$$

2. 环行器性能的测量

将吸收负载接于三端口环行器的一个端口上，仿照上述方法，可测其余两个端口的正向传输损耗 α_+ 、输入驻波比 ρ 和反向隔离衰减 α_- 。要求：用直接法测量各端口输入时的正向损耗；用替代法测其相应的反向隔离衰减。由此可知三端口环行器的旋转对称性，测量步骤自行考虑。

注意事项

1. 调配检波器时，改变螺钉插入深度，使驻波的幅值下降，注意测量线的探针必须跟随腹点或节点变动。
2. 在实验过程中，注意保持匹配状态不变坏，即不能改变短路活塞和螺钉位置。
3. 对测量放大器，不仅要记录表头指示值，还应记下放大器输入端“输入电压”所指示的衰减倍数。在测量衰减相对大小时，放大器倍数调节旋钮不能改变。

预习思考题

1. 本实验为什么速调管源要选在方波调制状态？
2. 为什么将隔离器接入测量系统能同时完成直接法和替代法的测量？衰减器置于什么刻度上较好？

实验问答题

1. 两种微波衰减测量方法的原理有什么不同？
2. 用直接法和替代法测量同一个衰减器时结果不完全一样，其主要原因是什么？怎样提高它们的测试精度？如何正确选用？
3. 试说明为什么环行器能作为隔离器使用？
4. 通过实验，你认为怎样调配检波器才能又快又好？为什么？