



# 微波与射频技术实验教程

weibo yu shepin jishu shiyan jiaocheng

蒋鸿雁 龙云亮 潘楚华 编

中山大学出版社

TN015/46

2007

# 微波与射频技术实验教程

蒋鸿雁 龙云亮 潘楚华 编

中山大学出版社

·广州·

版权所有 翻印必究

图书在版编目 (CIP) 数据

微波与射频技术实验教程/蒋鸿雁, 龙云亮, 潘楚华编. —广州: 中山大学出版社, 2007. 9

ISBN 978 - 7 - 306 - 02931 - 7

I. 微… II. ①蒋… ②龙… ③潘… III. ①微波技术—高等学校—教材 ②射频—技术—高等学校—教材 IV. TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 128793 号

---

出版人: 叶侨健

责任编辑: 李海东

封面设计: 曹巩华

责任校对: 何凡

责任技编: 何雅涛

出版发行: 中山大学出版社

电 话: 编辑部 020 - 84111996, 84113349

发行部 020 - 84111998, 84111981, 84111160

地 址: 广州市新港西路 135 号

邮 编: 510275 传真: (020) 84036565

网 址: <http://www.zsup.com.cn> E-mail: [zdcbs@mail.sysu.edu.cn](mailto:zdcbs@mail.sysu.edu.cn)

印 刷 者: 佛山市南海印刷厂有限公司

规 格: 787mm × 960mm 1/16 10.5 印张 262 千字

版次印次: 2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 20.00 元 印数: 1 - 3000 册

---

如发现因印装质量问题影响阅读, 请与出版社发行部联系调换

## 序 言

本书是专门用于微波测量和射频训练实验的指导书。本书的第一部分为微波测量实验，主要取材于为中山大学电子专业开设的微波技术实验而编写的微波实验讲义；本书的第二部分为射频训练实验，主要是针对深圳安泰信电子有限公司的射频模块训练系统以及相关的测试仪器而编写。

本书的参考教学时数为45个学时。在进行本书的实验之前，要求学生具备微波技术及射频技术的相关知识。

本书的出版得到中山大学实验设备管理处实验教学研究改革项目（教材专项）经费以及中山大学电子与通信工程系承担的广东省名牌专业“电子信息科学与技术”专项建设经费的资助，在此，作者表示衷心的感谢；本书的部分图形由常莉莉老师绘制，在本书的编写过程中，刘敏老师也曾提供帮助，在此表示诚挚的谢意。

请读者不吝指正本书的错漏。

作 者

2007年8月盛夏于康乐园

# 目 录

## 第一部分 微波测量

前 言 .....	(1)
实验 1 微波测量系统的认识与调试 .....	(5)
实验 2 测量线使用与晶体检波器校准 .....	(8)
实验 3 大驻波比的测量 .....	(15)
实验 4 小驻波比的测量 .....	(21)
实验 5 阻抗测量及阻抗匹配技术 .....	(27)
实验 6 谐振腔 $Q$ 值的测量 .....	(32)
实验 7 微波功率和衰减的测量 .....	(44)
实验 8 定向耦合器特性的测量及应用 .....	(50)
实验 9 相移量的测量 .....	(55)
实验 10 介电常数的测量 .....	(60)

## 第二部分 射频训练系统

前 言 .....	(65)
实验 1 傅立叶分析 .....	(66)
实验 2 频谱分析仪 .....	(71)
实验 3 射频传输线 .....	(74)
实验 4 传输线上的波 .....	(80)
实验 5 阻抗匹配 .....	(85)
实验 6 定向耦合器 .....	(88)
实验 7 滤波器 .....	(92)
实验 8 宽带放大器的频率特性 .....	(96)
实验 9 功率分配器 .....	(99)
实验 10 功率衰减器 .....	(102)
实验 11 混合环 .....	(105)
实验 12 线性放大器的动态范围 .....	(108)
实验 13 射频天线 .....	(112)
实验 14 压控振荡器 .....	(118)
实验 15 射频调制器 .....	(121)

实验 16	射频发送机 .....	(128)
实验 17	混频器 .....	(131)
实验 18	检波器 .....	(136)
实验 19	射频接收机 .....	(139)
实验 20	EMC 测试 .....	(143)
实验 21	S 参数的幅值测量 .....	(149)
附录 1	波 导 .....	(152)
附录 2	微波测量实验中的统一符号 .....	(153)
附录 3	波导测量线 .....	(154)
附录 4	频谱分析仪 AT6011 .....	(157)
参考文献	.....	(162)

# 第一部分 微波测量

## 前言

### 一、微波的应用情况

通常微波指的是分米波、厘米波和毫米波。其频率范围，一种说法是 300 MHz ~ 300 GHz，相应波长是 1 m ~ 1 mm；另一种说法是 1 GHz ~ 1000 GHz，相应的自由空间的波长为 30 cm ~ 0.3 mm。

#### 1. 微波的优点

微波波谱处于无线电波谱的高端，波长较短，因此带来一系列的优点。因为波长短，使得同样尺寸的天线具有较高的方向性和分辨能力，或相同性能的天线具有相对小的尺寸。在微波波段，电波在大气中衰减比较小（与红外、光波相比较），并且能够穿过电离层。对于通信、雷达、遥感、遥测、全球定位系统（GPS, global positioning satellites）等应用系统来说，微波确实提供了非常好的性能：低的大气传播衰减，高的辐射方向性和高的分辨率。因为波长短，在相对频率带宽相同时，微波能提供较宽的可用的频谱。例如，分米波段、厘米波段和毫米波段的频谱宽度分别为 2.7 GHz、27 GHz 和 270 GHz，这是一个非常丰富的频谱资源，必须很好地利用和配合。因为波长短，使得微波设备的尺寸可以做得相对较小，便于安装在飞机、导弹、卫星等各种飞行物中。正是由于微波的这些优点，微波工程在国防工业和信息产业中的地位变得至关重要，几十年来对微波波谱的开发和利用经久不衰，而微波也从最初的军事应用逐渐转变到以民用为主。

#### 2. 射频/微波电路的应用

传统的微波工程研究的是频域信号的产生、放大、变换、传输、辐射、传播、散射、接收、检测等技术。随着大规模、高密度、高速数字集成电路的发展，数字通信速度高达 2.4 Gb/s，使得时域微波的问题变得越来越突出，时域脉冲信号高达 2.4 Gb/s 时，其频谱更宽，芯片内部和集成电路的互连线的互耦串音等问题都向传统的频域微波工程提出了挑战。

由于集成度的提高和小型化的需求，频域和时域微波电路的元器件、部件的封装成为

电路的有机组成部分，微波工程技术的分析方法在这一领域可以大显身手，用以提高芯片的性能、可靠性、成品率，加快其商业化的步伐。

射频/微波电路的经典用途是通信和雷达系统，近年来发展最为迅猛的当属个人通信系统，当然，导航、遥感、科学研究、生物医学和微波能的应用也占有很大的市场份额。射频/微波电路的主要用途归纳如下：

(1) 无线通信系统：空间通信，远距离通信，无线对讲，蜂窝移动，个人通信系统，无线局域网，卫星通信，航空通信，航海通信，机车通信，业余无线电等。

(2) 雷达系统：航空雷达，飞行器雷达，防撞雷达，气象雷达，成像雷达，警戒雷达，武器制导雷达，防盗雷达，警用雷达，高度表，距离表等。

(3) 导航系统：微波着陆系统 (MLS)，GPS，无线信标，防撞系统，航空、航海自动驾驶等。

(4) 遥感：地球监测，污染监测，森林、农田、鱼汛监测，矿藏、沙漠、海洋、水资源监测，风、雪、冰监测，城市发展和规划等。

(5) 射频识别：保安，防盗，人口控制，产品检查，身份识别，自动验票等。

(6) 广播系统：调幅 (AM)、调频 (FM) 广播，电视 (TV) 等。

(7) 汽车和高速公路：自动避让，路面告警，障碍监测，路车通信，交通管理，速度测量，智能高速路等。

(8) 传感器：潮湿度传感器，温度传感器，长度传感器，探地传感器，机器人传感器等。

(9) 电子战系统：间谍卫星，辐射信号检测，行军与阻击等。

(10) 医学应用：磁共振成像，微波成像，微波理疗，加热催化，病房监管等。

(11) 空间研究：射电望远镜，外层空间探测等。

(12) 无线输电：空对空、地对空、空对地、地对地输送电能等。

## 二、微波测量的特点

微波测量技术是微波技术的辅助部分，它对微波技术的发展和作用起着很重要的作用。同其他尖端科学技术一样，微波技术中有很多问题在理论上并没有完满解决，微波理论是否正确，只有通过生产实践和科学实验才能加以检验。例如，理论上可以计算出空腔谐振腔的品质因素，但由于实际加工生产出来的谐振腔不一定完全理想，因此，空腔谐振腔的品质因素仍然要由实际的测量结果决定，而根据实际测量的结果又可进一步验证理论计算。在微波元器件和微波设备的生产过程中，微波测量也是必不可少的。例如，工厂生产出来的隔离器、匹配器、环行器等各种微波元件，都必须通过测试来检验它是否符合设计的技术指标。此外，在实际工作中，我们还常常需要知道振荡器的振荡频率、输出功率以及传输线的匹配情况等。可见，在科学研究和生产实际中，微波测量技术是极其重要的环节。微波测量技术早已经作为一种常用的实验技术列入实验物理的内容，很多基本物理研究，如实践标准、微波波谱分析、粒子加速器等都要用到微波测量技术。因此，掌握微波测量技术是极其重要的。但必须指出，微波测量技术本身是建立在理论的基础上。因此，掌握足够的微波理论是正确地、灵活地运用微波测量技术的必要条件。



微波技术主要研究如何导引电磁波在微波传输系统中的有效传输，它的特点是：希望电磁波按一定的要求沿着传输系统无辐射地传输。因为对传输系统而言，辐射是一种能量的损耗。

在一个大系统，如通信系统、雷达系统、遥感系统或 GPS 中，微波工程系统通常是其中的一个子系统，其特征是微波系统工作在微波波段。从硬件的观点而言，微波设备是一个大系统的子系统，但在确定大系统的总体指标时，微波子系统的指标和参数起着非常关键的作用，如天线的方向图、天线的增益、微波子系统的噪声、增益、工作频率、尺寸、重量等都是影响全局的参数。

微波技术是无线电技术向高频发展而形成的分支，它与一般的无线电技术有着共同的基础。因此，两种测量也并非毫无共同之处，某些微波测量的方法也在低频中应用（如驻波测量法），而低频测量中的差频法在微波测量中也能应用。

微波测量的内容很多，实验课中所进行的是微波基本量的测量。与一般的无线电测量相比较，微波测量具有很多不同的特点：

(1) 测量的基本量是功率  $P$ 、波长  $\lambda$ 、驻波比  $S$ ，而不是电压  $V$ 、电流  $I$  和电阻  $Z$ 。在低频时，无线电工程测量均建立在原始参量电压、电流和频率的基础上，其他参量，如波长、功率、阻抗、品质因素和放大系数等均可由这三个基本量导出。然而，随着频率提高到微波波段，电压、电流不仅失去了原来的意义，而且根本无法直接测量，所以，电压、电流不能再作为微波测量的基本参数。微波的重要特点是频率高，波长短（和电路的尺寸差不多甚至更小），电磁场的空间效应不能忽略，因此不能像低频那样用电路的概念和方法来处理问题，而是必须采用场的概念来研究微波问题。因此，微波测量的基本量是以场强为基本量的驻波比、功率、波长等，而其他参量如阻抗（或导纳）、衰减系数、增益和品质因素等，原则上都可以由基本量导出。例如，功率一般是借助能量变换装置，将微波电磁能变换成其他形式的能量来测量，而不是从电压和电流出发来进行计算的；波长则往往根据电磁场的驻波分布直接进行长度的测量；阻抗测量是通过测量驻波比以及驻波最小点至负载的距离，从而确定阻抗；衰减量的测量则可以转化为功率的测量；谐振腔  $Q$  值的测量可以转化为频率和驻波比的测量等。

(2) 用分布参数的元器件代替集中参数的元器件。在低频时，每一个元器件都有特定的电参数值，如电阻、电容、电感等。但是，在微波波段，由于频率高，波长同一般电子元件的尺寸差不多，故一般的接线或普通的电子元件就相当于天线，将会产生严重的辐射。因此，在微波电路中，一般低频集中参数的电阻、电容和电感已不能使用，而应以闭合的波导管、空腔谐振器以及各种类型的波导元件来代替一般传输线、振荡回路和电路元件。

(3) 在低频和微波波段的电路实现具有很大的区别。例如：

开路：不接任何元器件就可以在低频时实现开路；在微波波段，如果不接元器件，则从开路处会有微波辐射出去，因此要用到可调短路器才可实现真正的开路，在短路时再移动  $1/4$  个波长就可实现开路。

短路：在低频时，用一根导线就可以实现短路；在微波波段，需要用一块短路板或可调短路器来实现短路。

匹配：在低频时，调节电压和电流可以实现匹配；在微波波段，需采用各种匹配器，

调节可调螺钉来实现匹配。

滤波：在低频时，实现滤波的电路非常容易；在微波波段，采用传输线的实现方式，如波导、同轴线、带状线和微带等，用这些传输线的电抗元件可实现滤波器的四种频率变换（低通、高通、带通、带阻）。

谐振：低频时，用电容、电感实现谐振；在微波波段，是采用谐振腔，其等效电路是等效为电容、电感来实现谐振的。

(4) 机械加工要求十分严格。对于波导管来说，内壁要十分光滑，需要镀金或银，内部的光滑度对测量结果影响很大。

(5) 理论性强。微波测量本身有一套完整的系统的理论，是一门独立系统的课程。

### 三、辐射的问题

高强度微波电磁辐射（300 MHz ~ 300 GHz）通过“致热效应”引起机体的健康危害，已经得到有关研究的证实，而低强度微波电磁辐射长期暴露是否能引起机体的健康危害尚无定论。

移动通信设备、家用电器、广播电视等电磁波发射源的使用，使公众的电磁辐射（EMF）暴露量越来越高。尤其是移动通信的迅速发展，使公众所受到的微波辐射暴露更广泛，暴露量更高，其健康效应问题日益突出，相关研究也越来越多。

微波对人体的生物学作用是多方面的，主要研究集中在电磁辐射对诱变效应、致癌效应及对神经行为的影响。许多流行病学调查报道，低强度微波电磁辐射暴露可能对机体的许多方面造成不良影响。但实验室的研究结果存在很大差异，有些还相互矛盾，这可能是由于各研究所采用的暴露方法、暴露强度及所研究的生物学效应指标等方面的差异，使得研究结果之间缺乏一致性及重复性。因此，目前尚不能得出低强度电磁辐射生物学效应的明确结论。

# 实验 1 微波测量系统的认识与调试

## 1.1 实验目的

1. 了解微波测量系统。
2. 掌握用波长计测量频率的方法。

## 1.2 实验原理

### 1.2.1 微波测量系统

微波测量一般都是在由微波信号源和若干波导或同轴元件组成的微波测量系统上进行的，根据信号源输出功率电平的大小，可分为小功率和大功率两类微波测量系统，其中大功率波导测量系统主要用来测量大功率微波管的特性。

微波测量系统通常由三部分组成，图 1-1-1 所示的是一种较常用的小功率波导测量系统。图中信号源产生的微波信号通过同轴-波导转换进入测量系统。采用铁氧体隔离器作为去耦合衰减器，防止反射波进入信号源，影响其输出功率与频率的稳定。可调衰减器用来调节输出功率的大小，使指示器有适当的指示。正接的定向耦合器从主波导中分出部分功率到副波导中，供监视功率和测量频率之用，频率计和监视功率的检波器接在定向耦合器的副波导中，这样的安排可以防止在测量频率时对主波导的影响。在简单的测量系统中也有将频率计直接接入主波导的。测量线用来测量主传输线中的驻波参量，待测元件就接在驻波测量线的后面。必须指出：以上仅是一个例子，由于测量对象和所采用的测量方法不同，测量系统的布置也相应地有所变化。

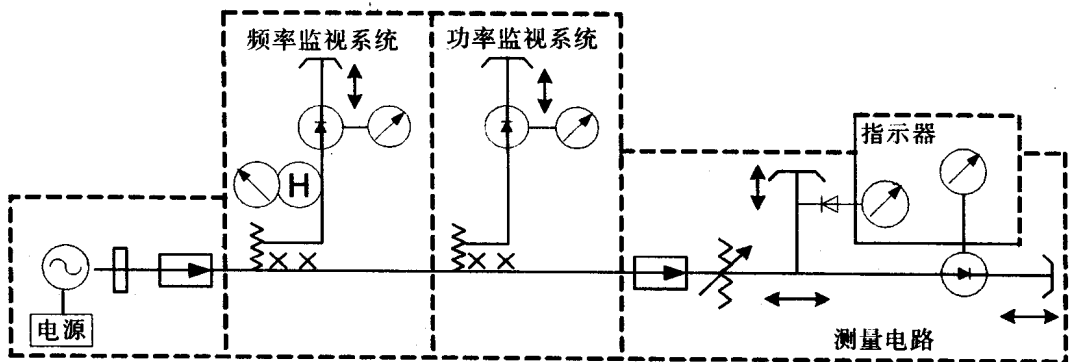


图 1-1-1 微波测量系统

小功率同轴测量系统与波导测量系统类似，只是所用的微波元件具体结构不同。

微波测量系统常用的有同轴和波导两种系统。同轴系统频带宽，一般用在较低的微波频段（2 cm 波段以下）；波导系统（常用矩形波导）损耗低、功率容量大，一般用在较高频段（厘米波段直至毫米波段）。

(1) 等效电源部分（即发送器），包括微波信号源，功率、频率监视单元和隔离器。信号源是微波测试系统的核心。微波测量技术要求具有足够功率电平和一定频率的微波信号，同时要求一定的功率和频率稳定度。功率和频率监视单元是由定向耦合器取出一小部分微波能量，经过检波指示来观察源的稳定情况，以便及时调整。为了减小负载对信号源的影响，电路中采用了隔离器。

(2) 测量装置部分（即测量电路），包括测量线、调配元件、待测元件、辅助器件（如短路器、匹配负载等），以及电磁能量检测器（如晶体检波架、功率计探头等）。

(3) 指示器部分（即测量接收器）。指示器是显示测量信号特性的仪表，如直流电流表、测量放大器、功率计、示波器、数字频率计等。

当对微波信号的功率和频率稳定度要求不大高时，测量系统可简化（图 1-1-2），微波信号源直接与测量装置连接，其工作频率可由波长计测得。实验室一般采用这种装置。

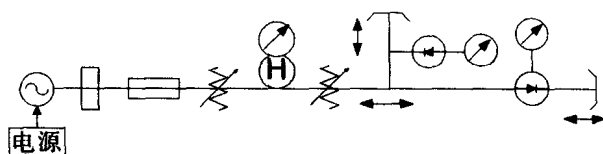


图 1-1-2 简化的微波测量系统

## 1.2.2 微波信号源

通常，微波信号源有电真空和固态的两种。

## 1.2.3 测量指示器

常用测量指示器有指示等幅波的直流微安表、光点检流计、微瓦功率计，有指示调制的测量放大器、选频放大器。此外，还可用示波器、数字电压表等作指示器。

实验室常用测量放大器作指示器，因为这类仪表灵敏度高，能对微波信号进行宽带或选频放大，接在测量线、晶体检波器、热敏电阻架及其他测试设备的输出端，可直接进行各类测量。

## 1.2.4 微波测量系统的连接与调整

进行微波测量，首先必须正确连接与调整微波测量系统。图 1-1-2 是实验室常用的微波测量系统，为了便于操作，信号源通常位于左侧，待测元件接在右侧。连接系统要求平稳，各元件接头对准。晶体检波器输出引线应该远离电源和输入线路，以免干扰。如果系统连接不当，将会影响测量精度，产生误差。

系统调整主要指测量线的调整以及晶体检波器的校准。

## 1.3 实验装置及仪器

### 1.3.1 实验装置

实验装置如图 1-1-3 所示。

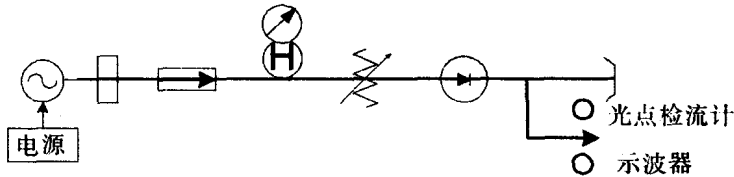


图 1-1-3 微波测量系统实验装置

### 1.3.2 实验仪器

实验仪器主要有微波信号源、隔离器、波长计、可变衰减器、晶体检波架、示波器、选频放大器（或者光点检流计）、数字小功率计（或  $\mu\text{A}$  表）。

## 1.4 实验内容及步骤

1. 熟悉测量装置中各种微波元件，了解其作用、主要性能及使用方法。
2. 熟悉信号源的使用方法。

(1) 将信号源的工作方式置于等幅位置，将衰减置于较大位置，晶体检波器输出端接至相应的指示器，记录测量结果。

(2) 将信号源的工作方式置于方波调制，将晶体检波器输出端接至示波器，观察示波器上的波形。

3. 用频率计测量信号源的工作频率。缓慢调谐频率计，仔细观察指示器上的变化，当指针出现一突降，频率计在指针最小偏转时的读数即为微波信号源的工作频率，记录频率计的读数，随即失谐频率计。

## 实验 2 测量线使用与晶体检波器校准

### 2.1 实验目的

1. 了解驻波测量线的结构、原理，并学会正确使用测量线。
2. 掌握晶体检波器的校准及波导波长的测量方法。
3. 掌握用直接法测量驻波比。

### 2.2 实验原理

#### 2.2.1 测量线的调整

进行微波测量，首先必须正确连接与调整微波测量系统。信号源通常位于左侧，待测元件接在右侧，以便于操作。要求整个连接系统平稳，各元件接头对准，晶体检波器输出引线应远离电源和输入线路，以免干扰。如果系统连接不好，将会影响测量精度，产生误差。

驻波测量线是微波测量中最基本、最常用的仪器之一，它在微波测量中用途很广，如测驻波、阻抗、相位、波长等。

测量线一般由一段开槽传输线、探头（耦合探针、探针的调谐腔体和输出指示）、传动装置三部分组成。由于耦合探针伸入传输线而引入不均匀性，其作用相当于在线上并联一个导纳，从而影响系统的工作状态，因此测量前必须仔细调整测量线，以减少其影响。

测量线的调整一般包括选择合适的探针穿伸度、调谐探头和测定晶体检波特性。

探针电路的调谐方法：先使探针的穿伸度适当，通常取 1.0 ~ 1.5 mm。然后测量线终端接匹配负载，移动探针至测量线中间部位，调节探头活塞，直到输出指示最大。

#### 2.2.2 波长的测量

测量波长常见的方法有谐振法和驻波分布法。前者用谐振式波长计（为使用方便，直接以频率刻度，也称频率计）测量，后者是用驻波测量线测量。

当测量线终端短路时，传输线上呈现出纯驻波，移动测量探针，测出相邻两个驻波节点之间的距离，即可求得波导波长。或者在测量线的输出端接精密可调短路器，将测量线探针置于某一个波节点处，旋动可调短路器活塞，则探针检测值随之由最小逐渐增至最大，然后又减至最小，即为相邻的另一个驻波节点，短路活塞移动的距离等于半个波导波长。

在传输横电磁波的同轴系统中，按上述方法测出的波导波长就是工作波长，即  $\lambda_g =$

$\lambda$ ；但在波导系统中，测量线测出的波长是波导波长  $\lambda_g$ ，根据波导波长和工作波长之间的关系式

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

便可以计算出工作波长  $\lambda$ ：

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

为了提高测量精度，通常采用交叉读数法确定驻波最小的位置，如图 1-2-1 所示，记录最小点两旁指示器读数为某一电平  $M$  处的指针位置，再求其平均值，便得到驻波最小点的位置：

$$d_{\min} = \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad d'_{\min} = \frac{d_3 + d_4}{2},$$

从而得到测量线中波导波长为：

$$\lambda_{gm} = 2(d'_{\min} - d_{\min}) = (d_3 + d_4) - (d_1 + d_2)。 \quad (1-2-3)$$

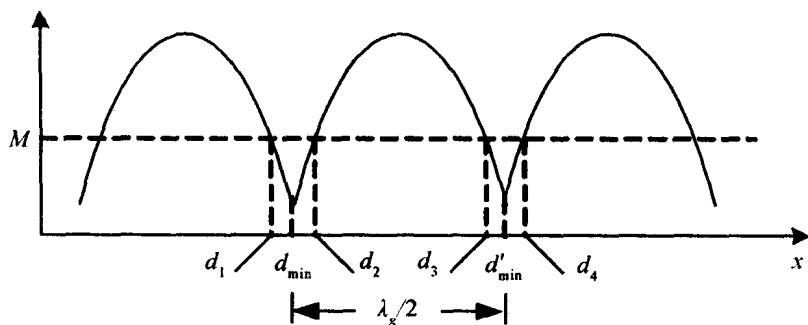


图 1-2-1 用交叉读数法确定驻波节点位置

在某些测量中，还需求出无槽波导中的波导波长  $\lambda_{gm}$ ，方法有如下两种：

(1) 直接测量法。将紧密可调短路器接在测量线的输出端，用测量线确定某一驻波节点位置，并将测量线探针置于该位置上，然后向信号源方向或其反方向移动可调短路活塞，使探针检测到相邻的另一个驻波点，这时，短路活塞移动的距离便等于半个波导波长。

(2) 计算法。由理论分析可得测量线的波导波长  $\lambda_g$  与相同截面的无槽波导中的波导波长  $\lambda_{gm}$  的关系：

$$\lambda_g = \lambda_{gm} \left(1 + \frac{\Delta x^2 \lambda_{gm}^2}{8\pi a^2 b}\right)。 \quad (1-2-4)$$

式中： $\Delta x$  为测量线的槽宽； $a$  和  $b$  分别为波导的宽度和高度。这样，只要测出  $\lambda_g$ ，并给出  $\Delta x$ 、 $a$  和  $b$  的尺寸，即可用迭代法求出  $\lambda_{gm}$ 。

### 2.2.3 晶体检波特性的测定

在微波测量系统中，微波能量通常是经过晶体二极管检波后送至指示器的，所以从电表上读到的是检波电流的有效值而不是高频电压。晶体二极管是非线性元件，其检波电流与两端电压之间的关系为：

$$I = K_1 |U|^n \quad (1-2-5)$$

式中： $K_1$  是比例常数； $n$  表征晶体管的检波规律，它与晶体检波器的特性及工作状态有关，故在精密测量中，必须事先对晶体检波律进行定标校准。

实验室常用的晶体定标方法为驻波法，它包括以下两种方法：

(1) 测量指示器读数与相对场强的关系曲线。

忽略波导的损耗和探针负载的影响，则当测量线终端短路时，沿线各点电场分布为

$$E = E_m \sin(\beta d) = E_m \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda_g}\right), \quad (1-2-6a)$$

$$\left|\frac{E}{E_m}\right| = \left|\sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda_g}\right)\right|. \quad (1-2-6b)$$

式中： $E_m$  为波腹处的场强； $d$  是离开驻波节点的距离。

近似地，晶体二极管的端电压  $U$  正比于探针所在位置的电场强度  $E$ ，所以

$$U = K_2 \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda_g}\right), \quad (1-2-7)$$

$$I = K_1 U^n = K \left[ \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda_g}\right) \right]^n \quad (1-2-8)$$

式中： $K_2$  为常数； $K$  为与  $K_1$ 、 $K_2$  有关的另一常数，两边取对数，可得

$$\lg I = \lg K + n \lg \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda_g}\right). \quad (1-2-9)$$

上式指出检波晶体的输出电流  $I$  与  $\sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda_g}\right)$  在全对数坐标系中是线性关系，如图 1-2-2，它的斜率就是  $n$ 。

可见，移动探针并逐点记下距离  $d$  与检波电流  $I$ ，就可作图，从而计算出  $n$ 。

实际上，也可以作出  $I - K \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda_g}\right)$  曲线，由  $I$  便可查出相应的电场强度  $E$ （图 1-2-3）。计算驻波比时，即直接用两个  $E$  值相除，而不必求出  $n$ ，使用更为方便。

(2) 利用半高点之间的距离确定晶体检波律。

测量线终端短路，测量驻波最大值，然后在最大值两边测量半高点（即为驻波最大值的一半）之间的距离  $W$ （图 1-2-4）。则可根据下式计算出  $n$ ：

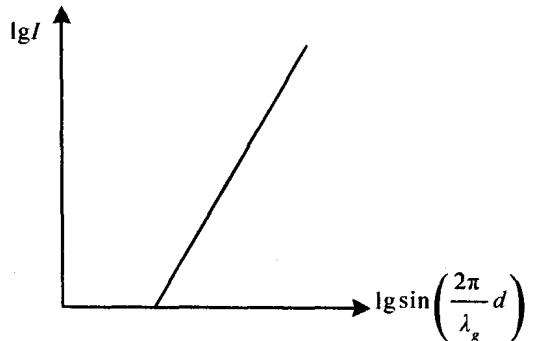


图 1-2-2 检波电流与距离的关系曲线



$$n = \frac{\lg 0.5}{\lg \cos\left(\frac{\pi W}{\lambda_g}\right)} = \frac{0.3010}{\lg \cos\left(\frac{\pi W}{\lambda_g}\right)} \quad (1-2-10)$$

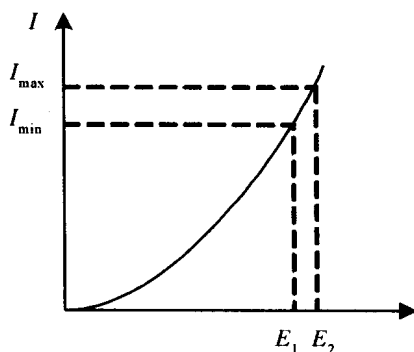


图 1-2-3 晶体检波律的定标曲线

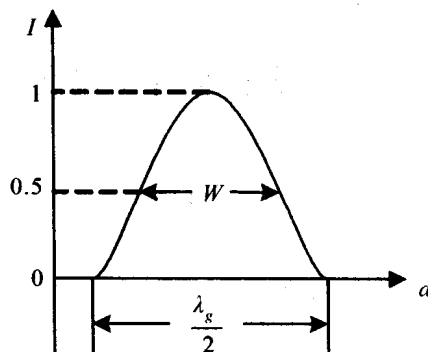


图 1-2-4 半高法校准晶体的检波特性

根据测定的晶体检波律，即能得到晶体平方律检波的工作范围。

实验中大多数微波测试系统属于小信号工作状态，因此，晶体检波律基本为平方律，如果不是精密测量，通常可取  $n=2$ 。

需要指出，上述方法测得的晶体二极管的定标曲线和检波律，实际上还包括指示器的非线性在内，在更换检测仪表或晶体管后都必须重新校准。同时，晶体的检波特性随时间、温度、湿度变化较大，校准工作应经常进行。

## 2.2.4 驻波比的测量

驻波比的大小是测量一个微波元器件性能优劣的重要指标，因此它是一个需要测量的基本参量，通常采用测量线进行测量。通过驻波测量，不仅可以直接测出驻波比的值，而且还可以间接求得阻抗、衰减量、相移量、谐振腔的品质因数、介质的介电常数以及微波元件的网络参数等，因此驻波比的测量是微波测量中最基本、最重要的内容之一。

微波器件的驻波比是指该器件在测量线中所形成的驻波电场最大值与最小值之比，即

$$S = \left| \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \right| \quad (1-2-11)$$

根据驻波比  $S$  的定义，可见  $S$  的变化范围很大：当系统匹配时， $S=1$ ；当系统处于全反射时， $S=\infty$ 。因此，一般按驻波比的大小分为：小驻波比， $S \leq 3$ ；中驻波比， $3 < S \leq 10$ ；大驻波比， $S > 10$ 。

测量驻波比的方法很多，本实验只介绍常用的测量方法——直接法。

直接法测量驻波比指的是直接测出测量线上最大场强  $E_{\max}$ （实际测出的是与它相对应的检波电流  $I_{\max}$ ）和最小场强  $E_{\min}$ （实际测出的是与它相对应的检波电流  $I_{\min}$ ），从而算出驻波比。若晶体的检波律为  $n$ ，则驻波比为：

$$S = \left( \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \right)^{1/n} \quad (1-2-12)$$