



高等学校电子信息类“十二五”规划教材

电波测量原理 与实验

郭宏福 马 超 编著
邓敬亚 刘高高



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子信息类“十二五”规划教材

电波测量原理与实验

郭宏福 马超 邓敬亚 刘高高 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍电波测量的相关原理与测量方法以及原理验证与应用实验,并结合电波传播与天线、电子信息科学与技术等专业的实验设备,从电磁波基本参数测量、传播特性测量、传输特性测量、微波组件与网络传递特性测量、天线特性参数测量、电磁辐射测量、测量数据处理方法等方面全面介绍了电磁波传播、传输、辐射、接收、天线等基本测量原理与实验。

本书内容广泛、系统性较强,可作为电子信息科学与技术、电子信息工程、电波传播与天线、应用物理等相关专业电子技术、通信技术、微波技术、天线技术等专业方向的本科生、硕士研究生的实验课程教材,也可供从事通信、雷达、电子系统、射频、天线与微波技术工作的有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电波测量原理与实验/郭宏福等编著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2015. 2

高等学校电子信息类“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3565 - 1

I. ① 电… II. ① 郭… III. ① 电磁波测量法—高等学校—教材

IV. ① TB972

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 024798 号

策划编辑 李惠萍

责任编辑 李惠萍 曹 锦

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 北京京华虎彩印刷有限公司

版 次 2015年2月第1版 2015年2月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 19

字 数 450千字

定 价 34.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3565 - 1/TB

XDUP 3857001 - 1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

1886年物理学家 Einrich Hertz 演示了“无线电波”之后, Nikola Tesla、Gugliemo Marconi 等人开创了无线电通信。到第二次世界大战开始时, 无线电探测和测距已经成为盛行的无线电波的应用。当代无线电波在军事和通信领域的应用持续增长, 使得无线电信号在现代世界中变得无所不在, 特别是射频和微波信号的发展和应用, 使得无线电信号测量越来越重要。

当前, 随着电磁波理论的不断发展和其与电子科技各学科之间相互渗透, 电磁波应用领域已经发生了深刻的变化, 电波测量已经成为信息技术发展的主要工具之一。许多新的测量理论与思想和方法在电波测量领域得到了应用, 并且许多新技术、新原理、新设备不断涌现, 这使得仅有的几本传统电波测量相关教材无法紧密跟踪当今科技的发展, 不能满足新时期电波测量的需求。目前, 电子信息科学与技术、电波传播与天线、电子信息工程、应用物理等专业电波测量的相关专业实验课程一直无较全面的教材, 各个大学开设的相关电波测量实验课程使用各自编写的实验讲义, 虽然用自编讲义授课大体上来说比较适合这些专业的需求, 但其中许多测量技术、原理、方法、设备还不全面, 其内容结构、讲解先后次序的逻辑不是很合理, 有待完善和增强。

作者查阅了电波测量与实验的相关教材, 在参考国内外众多参考文献的基础上, 以西安电子科技大学董树义教授编写的《微波测量技术》和雷振亚教授编写的《电磁场与微波技术实验教程》为理论指导, 基于自编的《电波测量实验讲义》以及陕西省电波测量与天线实验教学示范中心的教学设备, 针对目前电波测量原理与实验教材的部分缺失以及现有教材所暴露的问题, 根据近年本科教学改革的要求, 结合多年来的教学和科研经验编写了本书, 以填补目前电子信息科学与技术、电波传播与天线、电子信息工程等相关专业电波测量实验教材的空白。

本书是作者长期工作经验的总结, 也是老一辈电波测量工作者智慧的结晶。为了便于教学和使本书具有较强的理论性和系统性, 在总结教学经验和收集、整理近代微波测量方法的基础上, 采取理论知识上循序渐进, 内容上从电磁波信号基本参数入手, 以通信、雷达、电子系统工作过程中电磁波信号存在形式为流程, 从电磁波发射信号方式、发送与接收的天线到电波信号在介质中的辐射、传播、传输的过程为主线介绍各阶段电波参数、测量理论与实验来编制本书的章节。与传统教材相比, 本书在体系结构上进行了较大调整, 强调测量原理与方法, 与现有的实验内容配套, 增加实验技术与设备介绍, 内容新颖, 既保留传统知识的精华, 又尽可能地反映电波测量最新进展情况, 充分满足和体现西安电子科技大学在微波、电波传播、天线学科和专业的优势以及专业实验教学优势课程的需求。

本书的主要特点如下:

(1) 既有基本理论, 又有测量方法。本书介绍电波测量理论与基本测量原理、方法, 使学生能灵活地应用所学的理论知识处理各自专业应用中出现的相关问题, 可同时学习和巩固电磁波理论、天线原理和电波传播的知识, 又能将相关理论知识与现有电磁波测量基本原理、方法相结合。

(2) 测量原理介绍内容全面, 适用面广。本书与“电磁场和电磁波”、“微波技术”、“天线原理”、“电波传播”、“通信原理”、“雷达原理”等专业理论课内容衔接紧密, 对这些课程中的理论与原理进行验证和应用, 涉及电磁波传播、传输、辐射、接收等基本测量原理与实验, 适用于通信工程、电子信息工程、电子信息科学与技术、电波传播与天线专业及相关专业的教学。

(3) 结合新技术与新设备, 培养学生实践能力。本书除基本的电波测量原理与实验内容外, 结合近几年西安电子科技大学独特的微波测量实验设备以及购置的实验新设备, 还介绍电磁波测量中设备基本工作原理、测量数据的分析及处理方法等内容, 并有部分开发和研究性的实验内容, 旨在加强培养学生的应用能力和实践创新能力。

本书的具体内容如下:

第1章, 电波信号基本参数的测量, 包括微波频率测量、驻波比测量、功率测量原理及相关实验内容。

第2章, 电波基本传播原理与特性测量, 包括微波反射、衍射、干涉、极化等特性的测量原理与相关实验内容。

第3章, 电波信号时域与频域特性测量, 包括传播与传输中常用的 AM、FM、FSK、PSK 等信号的时域特性分析与测量和这些信号的频谱分析与测量以及相关实验内容。

第4章, 传输线特性与测量, 包括传输线特性以及传输线匹配特性、阻抗特性等的测量原理与相关实验内容。

第5章, 电波网络传输特性与测量, 主要介绍传输中常见各种网络参数与测量方法, 包括网络传输特性的标量参数测量(如衰减特性、耦合特性、反射特性、阻抗特性等的测量原理与相关实验内容)和网络传输特性的矢量参数测量(如衰减特性、相移特性、反射特性、阻抗特性等的测量原理与相关实验内容)。

第6章, 电磁辐射场测量原理与实验, 包括电磁辐射场的形成、测量原理与相关实验内容。

第7章, 天线基本特性参数测量, 包括天线特性基本参数介绍、测量原理与相关实验内容。

第8章, 电波测量误差分析与结果评定, 介绍电波测量实验数据的分析及处理方法。

本书由郭宏福、马超、邓敬亚、刘高高共同编著。郭宏福编写了全书的初稿, 马超参与编写和修改了第1章, 邓敬亚参与编写和修改了第6章的部分内容, 刘高高参与编写和修改了第8章的部分内容。参加本书修改和校对的还有高桂华、侯华楠、张凤霞、徐抄、巩宇龙、张飞龙、黄芬、翟彬、邱皓远等。西安电子科技大学电波研究所的同事们也为本书的出版提供了帮助, 在此特别致谢。感谢西安电子科技大学教务处和西安电子科技大学出版社对本书编写的帮助与大力支持。

本书难免有疏漏和不妥之处, 恳请读者批评指正。

作者

2014年12月

目 录

第1章 电波信号基本参数的测量	1	1.8.2 网络相移的测量	37
1.1 电磁波信号基本参数	2	1.9 基本参数测量实验	40
1.2 微波测量系统的组成	3	实验1-1 基于直读频率计测量电波	
1.2.1 微波波导测量系统	3	信号的频率	40
1.2.2 扫频测量系统	8	实验1-2 信号波长的测量和驻波比	
1.3 微波频率测量	8	测量	41
1.3.1 谐振式频率计	8	实验1-3 晶体检波器的定标	43
1.3.2 外差式频率计	10	实验1-4 驻波分布特性的测量	47
1.3.3 数字式频率计	11	实验1-5 利用测量线测量驻波比	
1.4 驻波比测量	12		48
1.4.1 探针调谐与晶体定标	12	实验1-6 单端口阻抗参数测量	51
1.4.2 驻波比测量方法	15	实验1-7 信号功率测量	55
1.4.3 网络分析仪测量驻波比	18	实验1-8 定向耦合器的性能测量	
1.5 微波阻抗测量	19		56
1.5.1 单口网络阻抗基本测量方法	20	实验1-9 衰减器参数测量	58
1.5.2 双端口互易网络阻抗的测量	20	实验1-10 相移器参数测量	61
1.5.3 双端口互易网络散射参数的测量		第2章 电波基本传播原理与特性测量	64
.....	21	2.1 电波传播与传输特性的基本理论	
1.5.4 网络分析仪测量单端口阻抗	21		64
1.6 微波功率测量原理	22	2.1.1 电波传播中电波反射和折射特性	
1.6.1 常见微波功率测量原理	22		64
1.6.2 常见微波功率传感方式	22	2.1.2 电波传播中电波散射特性	65
1.6.3 微波功率测量的误差来源和		2.1.3 电波传播中电波衍射特性	66
处理方法	23	2.1.4 电波传播中电波干涉特性	67
1.7 网络的衰减及其测量	25	2.1.5 电波传播中电波极化特性	68
1.7.1 衰减特性	25	2.2 传播实验原理与仪器	69
1.7.2 衰减测量方法	28	2.2.1 实验原理	69
1.8 网络的相移及其测量	34	2.2.2 微波分光仪的结构	69
1.8.1 网络相移的概念	34	2.3 传播实验内容	70

实验 2-1 电波反射特性测试	70	实验 3-2 信号傅里叶变换分析	122
实验 2-2 电波单缝衍射特性测试	72	实验 3-3 AM 信号的产生与波形测量	123
实验 2-3 电波双缝干涉特性测试	74	实验 3-4 FM 信号的产生与波形测量	125
实验 2-4 电波迈克尔逊干涉特性测试	77	实验 3-5 AM 信号的频谱测量	127
实验 2-5 电波偏振特性测试	78	实验 3-6 FM 信号的频谱测量	130
实验 2-6 电波布拉格衍射特性测试	80	实验 3-7 电视信号的频谱测量	132
第 3 章 电波信号时域与频域特性测量	84	第 4 章 传输线特性与测量	136
3.1 信号时域分析	84	4.1 传输线理论与特性参数	136
3.2 信号频域分析	86	4.1.1 传输线的基本概念以及分布参数的概念	137
3.2.1 频谱分析的概念	86	4.1.2 传输线方程及其解	138
3.2.2 傅里叶变换的性质	89	4.1.3 传输线的阻抗和反射系数	138
3.2.3 周期信号的频谱分析	89	4.1.4 无耗传输线工作状态的分析	139
3.2.4 非周期信号的频谱分析	91	4.2 传输线参数计算与测量	141
3.2.5 频谱分析的应用	93	4.2.1 Smith 圆图	141
3.3 时域测量原理	93	4.2.2 传输线参数计算	145
3.3.1 波形测量方法	95	4.3 传输特性参数测量实验	158
3.3.2 波形测量参数	96	第 5 章 电波网络传输特性与测量	165
3.3.3 示波器测量技术	97	5.1 网络特性与测量原理	165
3.4 频谱测量原理	101	5.1.1 网络分析的基本概念	165
3.4.1 频谱测量概念	101	5.1.2 网络分析系统	167
3.4.2 频谱测量参数	101	5.1.3 反射参数测量	169
3.4.3 频谱参数测量方法	102	5.1.4 传输参数测量	171
3.5 时域测量仪器	106	5.2 网络分析仪原理	174
3.5.1 模拟示波器	106	5.3 传输特性测量实验	177
3.5.2 数字存储示波器	108	5.3.1 基于 RF2000 标量网络传输特性测量实验	177
3.5.3 数字荧光示波器	109	实验 5-1 短路线、开路线、匹配负载 S 参数的测量	177
3.5.4 数字采样示波器	111	实验 5-2 π 型与 T 型阻抗匹配 S_{11} 和 S_{21} 参数的测量	178
3.6 频谱分析仪器	112	实验 5-3 π 型与 T 型功率衰减器 S_{11} 和 S_{21} 参数的测量	179
3.6.1 扫描式频谱分析仪	112		
3.6.2 矢量信号分析仪	118		
3.6.3 实时频谱分析仪	119		
3.6.4 基于数字存储示波器的频谱测量	121		
3.7 时域与频域测量实验	121		
实验 3-1 频谱分析仪的使用	121		

实验 5-4 电阻式功率分接器与威尔金森式功率分接器 S_{11} 和 S_{21} 参数的测量	180	6.2.3 电磁能的发射与传播途径	213
实验 5-5 定向耦合器特性参数测量	181	6.3 电磁辐射场分类	214
实验 5-6 低通滤波器与带通滤波器 S_{11} 和 S_{21} 参数的测量	183	6.3.1 电磁辐射	214
实验 5-7 放大器 S_{11} 和 S_{21} 参数的测量	183	6.3.2 电磁兼容	215
实验 5-8 射频振荡器频率值的测量	184	6.4 电磁辐射测量仪器	216
实验 5-9 微带接收和发射天线 S_{11} 参数测量	185	6.4.1 宽带场强测量仪	217
5.3.2 基于矢量网络分析仪传输特性测量实验	186	6.4.2 选频式辐射测量仪	219
实验 5-10 矢量网络分析仪的使用和校准	186	6.5 电磁辐射场测量方法	225
实验 5-11 滤波器(LPF、HPF、BPF、BSF)	189	6.5.1 基本场强测量	225
实验 5-12 衰减器	191	6.5.2 EMF 基本辐射测量	226
实验 5-13 匹配负载与失配负载	194	6.5.3 EMC 测量	228
实验 5-14 功率分配器	196	6.6 电磁辐射测量实验内容	229
实验 5-15 分支耦合器	197	实验 6-1 场强仪的使用	229
实验 5-16 定向耦合器	199	实验 6-2 利用选频场强仪测量 AM 广播频道分布	230
实验 5-17 混合环	201	实验 6-3 利用选频场强仪测量 FM 广播频道分布	232
实验 5-18 环行器	202	实验 6-4 利用选频场强仪测量 FM 电视广播频道的分布	234
实验 5-19 PINRF 开关	203	实验 6-5 利用宽带场强仪测量电子设备电磁辐射强度与分布	237
实验 5-20 放大器	204	实验 6-6 利用宽带场强仪测量环境电磁辐射强度与分布	241
第 6 章 电磁辐射场测量原理与实验	207	实验 6-7 利用干扰接收机测量实验设备的干扰辐射分布	242
6.1 电磁辐射场基本特性	207	第 7 章 天线基本特性参数测量	244
6.1.1 电磁辐射场的产生及性质	207	7.1 天线主要技术参数	245
6.1.2 电磁辐射场的基本术语	208	7.1.1 天线的电磁波辐射	245
6.2 电磁辐射场测量基础	210	7.1.2 天线方向性	245
6.2.1 电磁场的远场和近场划分	210	7.1.3 天线效率	247
6.2.2 电磁辐射频率范围	212	7.1.4 增益系数	247
		7.1.5 天线阻抗	248
		7.1.6 天线极化	248
		7.1.7 频带宽度	250
		7.2 天线性能测试原理	250

7.2.1 方向图测量	250
7.2.2 测量增益的方法	253
7.2.3 天线反射系数与驻波比测量	255
7.2.4 天线阻抗与阻抗带宽测量	255
7.2.5 天线极化特性测量	258
7.3 天线测量实验系统	260
7.3.1 基于手动设备天线实验测量系统	261
7.3.2 自动天线实验测量系统	265
7.4 天线测量实验内容	267
实验 7-1 喇叭天线 E 、 H 坐标方向图 测量	267
实验 7-2 喇叭天线增益系数测量	272
实验 7-3 螺旋天线 E 、 H 面方向图测量	274

实验 7-4 八木阵子天线 E 、 H 面方向图 测量	276
--	-----

实验 7-5 天线驻波比与带宽参数测量	279
---------------------------	-----

实验 7-6 天线隔离度参数测量	280
------------------------	-----

实验 7-7 天线极化特性测量	282
-----------------------	-----

第 8 章 电波测量误差分析与结果评定	284
---------------------------	-----

8.1 电波测量实验数据的误差分析	284
-------------------------	-----

8.1.1 测量误差的基本概念	284
-----------------------	-----

8.1.2 测量数据误差的估计与处理	285
--------------------------	-----

8.2 测量结果评定	291
------------------	-----

8.2.1 准确度和精确度	291
---------------------	-----

8.2.2 不确定度	292
------------------	-----

参考文献	295
------------	-----

第1章 电波信号基本参数的测量

在无线电技术中,无线电波一般指波长由 100 000 m 到 0.75 mm 的电磁波。根据电磁波传播的特性,又分为超长波、长波、中波、短波、超短波、微波、毫米波等若干波段。表 1-0-1 给出了常见的无线电波的波段划分与应用。

表 1-0-1 无线电波的波段划分与应用

波段(频段)	符号	波长范围	频率范围	应用范围
超长波 (甚低频)	VLF	100 000~10 000 m	3~30 kHz	(1) 海岸—潜艇通信; (2) 海上导航
长波 (低频)	LF	10 000~1000 m	30~300 kHz	(1) 大气层内中等距离通信; (2) 地下岩层通信; (3) 海上导航
中波 (中频)	MF	1000~100 m	300 kHz~3 MHz	(1) 广播; (2) 海上导航
短波 (高频)	HF	100~10 m	3~30 MHz	(1) 远距离短波通信; (2) 短波广播
超短波 (甚高频)	VHF	10~1 m	30~300 MHz	(1) 电离层散射通信(30~60 MHz); (2) 流星余迹通信(30~100 MHz); (3) 人造电离层通信(30~144 MHz); (4) 对大气层内、外空间飞行体(飞机、导弹、卫星)的通信;电视、雷达、导航、移动通信
分米波 (特高频)	UHF	1~0.1 m	300~3000 MHz	(1) 对流层散射通信(700~1000 MHz); (2) 小容量(8~12 路)微波接力通信(352~420 MHz); (3) 中容量(120 路)微波接力通信(1700~2400 MHz)
厘米波 (超高频)	SHF	10~1 cm	3~30 GHz	(1) 大容量(2500 路、6000 路)微波接力通信(3600~4200 MHz、5850~8500 MHz); (2) 数字通信; (3) 卫星通信; (4) 波导通信
毫米波 (极高频)	EHF	10~1 mm	30~300 GHz	穿入大气层时的通信

无线电波的频段很宽,在不同的频段有不同的特性。在频率较低的短波频段及其以下频段,电磁波在传输线和电路中表现出了典型的集总参数特性;而在短波及以上频段,除

集总参数外还有分布参数的影响。由于集总参数的测量在基本电路分析与电子测量原理教材中有大量的介绍,因而本书主要介绍短波以上频段(即射频与微波频段)的电磁波电路、传播和传输中参数的测量原理与实验,重点介绍微波频段的测量原理与技术。

微波是波长很短的电磁波。一般所指的微波波段是从 300 MHz 至 3000 GHz 之间的电磁波(即波长从 1 m 至 0.1 mm)。在微波波段内又划分为分米波(300~3000 MHz)、厘米波(3~30 GHz)和毫米波(30~300 GHz)。由于毫米波频段的高频段在技术上已与一般微波频段有较大不同,因此又把毫米波的高频段部分归入亚毫米波段(1~0.1 mm)。在亚毫米波段中,将波长为 0.3 mm(1000 GHz)至 0.01 mm(3000 GHz)的电磁波又称为远区红外线。20 世纪 80 年代中后期,有人将频率在 0.1 THz 到 10 THz 范围的电磁波,波长在 0.03 mm 到 3 mm 范围的电磁波称为 THz 波(太赫兹波)或 THz 射线(太赫兹射线),它介于微波与红外之间。因此整个微波波段作为无线电波谱的高频段,大致可以概括为微波波段、毫米波波段、THz 波段,并与红外光谱相衔接。

电磁波测量是进行电磁波研究必不可少的一门专业技术,它与电磁波理论、技术相互交融,是其必不可少的组成部分。甚至可以说测量是科学研究的眼睛,没有测量的科学是盲目的科学。

电磁波测量的主要任务是:

- (1) 利用当前已有的射频、微波技术设备组成合乎要求的测量装置和仪器。
- (2) 利用当前已有的电磁波理论与技术,研究符合实际的测量方法,而新的日趋完善的测量方法又推动电磁波理论与技术的发展。
- (3) 在各项电磁波测量中,尽量分析并排除各种误差,实现必要的测量精确度,以保证在科研与生产中测量结果的可信程度。
- (4) 使用当前最先进的理论与技术,建立各项电磁波量值基准和各级传递标准,从而保证测量值的统一规范性。

本章主要介绍电磁波技术中基本参数的测量方法和测量系统的基本原理,以掌握电磁波测量的基本理论与技能。

1.1 电磁波信号基本参数

电磁波信号在工程应用中需要测量的参数主要有两类:一类是表示电磁波“信号特性”的参数;另一类是表示电磁波“网络特性”的参数。

关于电磁波信号特性,主要通过对功率、频率(波长)、波型、频谱和噪声等参数的测量来确定。

电磁波网络特性(有源网络)是指那些根据电磁波网络的等效概念,在传输主模条件下,把插入单根传输线的通过式元件(或存在的不均匀性)等效为双口网络,把单根传输线一端封闭的终端式元件等效为单口网络,把多分支元件或多根传输线的网络均等效为多口网络。描述这些网络外部特性的电参数称为网络参数。为了测量这些参数,可将多口网络化为双口网络再进行测试,而双口网络的反射参数又可通过化为单口网络来测试。因此,微波网络特性基本测试包括单口和双口网络参数的测试。其主要的参量有阻抗、复反射系数、驻波比和网络参数。

在微波理论分析与工程设计中,常使用散射参数来表示双口微波网络的特性。

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (1.1.1)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (1.1.2)$$

其中, a_1 、 a_2 为网络归一化电压输入波; b_1 、 b_2 为反射波和输出波; S_{21} 、 S_{12} 为传输系数; S_{11} 、 S_{22} 为反射系数。

对单端口网络常用反射系数 Γ 表示其特性, $\Gamma = b/a$; 也可用 Γ 的归一化阻抗 Z 来表示, $Z = (1 + \Gamma)/(1 - \Gamma)$ 。

上述参量均称为阻抗(复反射系数)与网络参数(含有源网络)。也可划分为反射参数(Γ 、 S_{11} 、 S_{22} , 有时也称阻抗参数)和传输参数(S_{12} 、 S_{21})两种。这五个参数都是复量,但在微波工程上为表征元器件的匹配程度,常用与反射系数的模值 $|\Gamma|$ 有关的标量参数作为主要技术指标,其测量方法较简单,成本较低,故把反射参数的测量又分为两种情况,即标量反射参数($|\Gamma|$ 、 $|S_{11}|$ 、 $|S_{22}|$)及驻波比 $Z = (1 + |\Gamma|)/(1 - |\Gamma|)$ 和矢量反射参数(Γ 、 S_{11} 、 S_{22} 、 Z)的测量。同样,也把传输参数分为标量传输系数($|S_{12}|$ 、 $|S_{21}|$)及衰减 $A = -20 \cdot \lg |S_{21}|$ 和矢量传输系数(S_{12} 、 S_{21})两种情况。实际的传输元件常需侧重说明其中某一项指标,故把矢量传输系数的模值和辐角再分为两个分项指标,即衰减 $A = -20 \cdot \lg |S_{21}|$ 和相位移 ($\Psi_{21} = \arg(S_{21})$)。当然,在很多情况下,仍需要全面测定其矢量网络参数。

下面介绍测量技术术语。

匹配状态 回波损耗 $R_L = -20 \lg(\text{dB})$ 表示反射波损失的大小。当回波损耗无穷大时,说明网络的反射波为零,即达到匹配状态。

衰减量 当双口网络输出端接匹配负载且输入端匹配时,网络的传输衰减称为网络衰减量。

相移量 当双口网络输出端接匹配负载且输入端匹配时,网络的传输引起的相移称为网络相移量。

1.2 微波测量系统的组成

微波测量系统一般可分为点频和扫频两种类型。在这两种类型中,随精确度要求不同,电路的繁简程度差异很大。

1.2.1 微波波导测量系统

微波波导测量系统是典型的点频测量线系统,多用于点频测量。微波波导测量系统又分为由测量线组成的测量系统和由反射计组成的测量系统。

1. 测量线组成的测量系统

测量线组成的测量系统基本思想是通过待测网络两端传输线上电压沿传输线分布的情况来测量驻波比 ρ 和 $\bar{d} = d_{\min} - d_T$, 推导出网络的阻抗 Z 、导纳 Y 、反射系数 Γ 。测量线组成的测量系统如图 1-2-1 所示。

测量系统应该由不同要求的测试精确度和实际可供仪器组成,一般包括微波信号源、测量装置和指示设备三个部分。

(1) 微波信号源。它是提供微波测试信号的设备。微波信号源有简易和标准,点频和

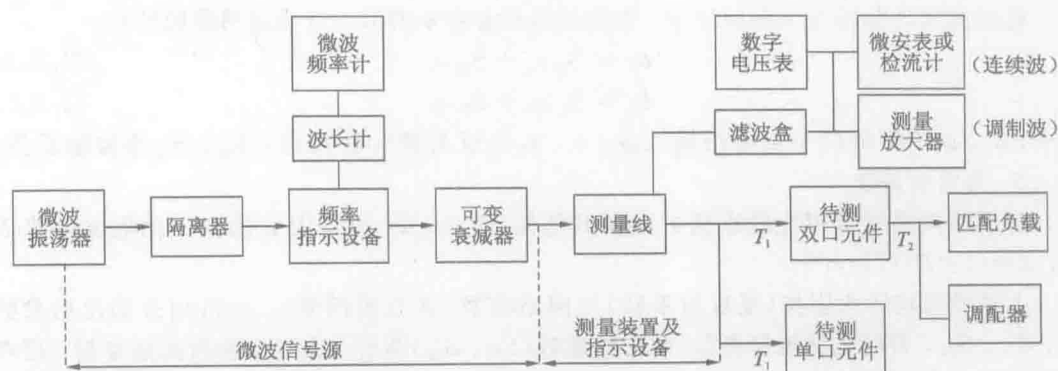


图 1-2-1 测量线组成的测量系统

扫频、稳频、稳幅和非稳频、非稳幅等之分。从产生微波信号的振荡器划分，微波信号源有反射速调管、返波管、磁控管、固态源和 YIG 调谐振荡器等。从输出功率上看，微波信号源有大功率、中功率和小功率之分。

微波振荡器产生的微波信号，经过隔离器、波长计或频率计、可变衰减器后，输出给测量装置作测试之用。这几个元件的作用分述如下：

隔离器通常选用铁氧体单向隔离器，其正向衰减一般小于 0.5 dB，反向衰减约为 20~30 dB。若手头没有单向隔离器，通常选用衰减量约为 10 dB 的固定或可变衰减器来代替。隔离器的作用是：由于待测元件产生的反射波回到振荡器时，使振荡器产生牵引现象，引起输出功率和频率的变动，为了减小这种现象，则在微波振荡器与测量装置之间接入隔离器，隔离器能大大减小牵引现象。采用铁氧体隔离器，是由于其正向衰减小，输出功率增大。

频率测量装置一般采用波长计或数字频率计、外差式频率计等，以测量微波信号的频率。应该注意，波长计若接在主系统上，测量完频率之后，要使其偏离谐振点，以免影响测试信号的稳定性。

可变衰减器：用来调整测试信号的大小。

作为一个测试系统，从振荡器到测量装置，在提供测试信号的输出端之前的所有装置称为信号源部分。从信号源输出端向源端看，源反射应该尽可能小，信号源应尽可能匹配，通常要求源驻波比 ρ 小于 1.02 (或 1.05)。

一般的简易信号源至少包括上述几个部分，有的还有功率指示装置。至于采用哪种微波信号源，是否要求调制等，则视具体情况而定。

(2) 测量装置。在图 1-2-1 中所用的测量装置是测量线。波导测量线按不同精度分为三级，其中主要指标是合成电压驻波比，分别为小于 1.01、1.03 和 1.05。

(3) 指示设备。当微波信号源输出连续波信号时，一般使用光电检流计或微安表、数字电压表等作为指示设备，或采用专用的驻波指示器。为提高指示灵敏度，可由微波信号源输出调制波（调制信号频率一般为 1 kHz），这时的指示设备一般采用选频放大器。在选用指示设备时，应该根据具体情况尽量选择灵敏度较高的仪表，以减小探针的加载作用，但同时也应注意不要陷入噪声电平之内。

在进行测量时，待测网络若为单口网络，可直接接到测量线的输出端，连接之后即可测试；若为双口元件，则需要在元件的另一端接上匹配负载来吸收双口网络的通过波，使

剩余反射变得更小。实际上容易得到的是一般的匹配负载，其剩余驻波比约为 1.055。若达不到所要求的测量精确度，可加入调配器把它降到 1.02 以下。

2. 反射计组成的测量系统

反射计的概念在微波测量中极其重要。除能测量标量反射参数外，还是微波网络分析仪、六端口测量技术及微波功率校准的基础。与测量线不同，反射计的基本思想是依照散射参数的定义，通过把入射电磁波、反射电磁波、传输电磁波分离开，然后求其比值来测量散射参数。通过散射参数即可推导出阻抗参数、导纳参数和正切参数。常见的反射计有定向耦合器反射计和电桥反射计。图 1-2-2 所示为双定向耦合器调配反射计线路。

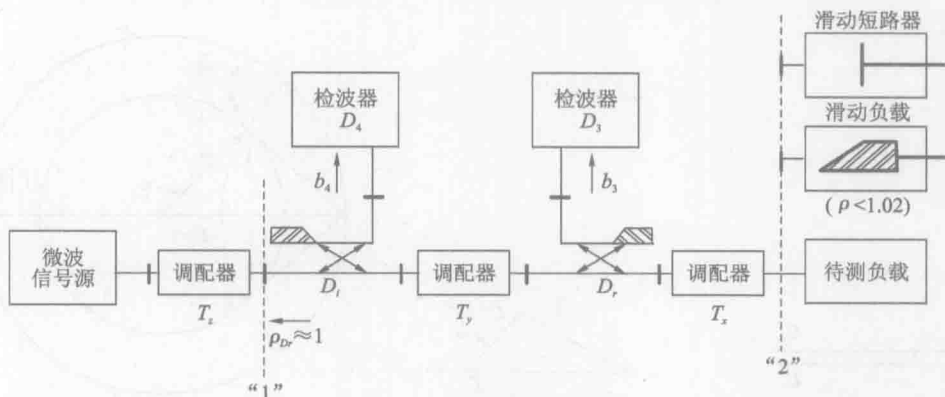


图 1-2-2 双定向耦合器调配反射计线路

理想反射计 $\left| \frac{b_3}{b_4} \right| = K |\Gamma_L|$ ， K 可以通过校准得到，从而可以得到 $|\Gamma_L|$ 的值。由于定向耦合器的非理想性，使得 $\frac{b_3}{b_4} = \frac{A\Gamma_L + B}{C\Gamma_L + D}$ ，即 $\left| \frac{b_3}{b_4} \right|$ 与 $|\Gamma_L|$ 失去线性关系（ A 、 B 、 C 、 D 是与双定向耦合器各端口 S 参数有关的值）。为使 $\left| \frac{b_3}{b_4} \right|$ 与 $|\Gamma_L|$ 恢复线性关系，必须增加调配器并与测试附件配合调试，使 $\frac{b_3}{b_4} = \frac{A\Gamma_L + B}{C\Gamma_L + D}$ 中的 B 、 C 为零。

下面介绍反射计增加检测端口法测量复反射系数。

在反射计与待测负载之间某一固定位置上接入一个探针耦合器（或测量线），将耦合输出接到另一只检波器上，组成一个五端口测量装置。探针深度和检波指示灵敏度可调，与待测端面 T_1 的距离设为 l_p 。探针位置为相位参考面。反射计-探针组合法测量复反射系数如图 1-2-3 所示。

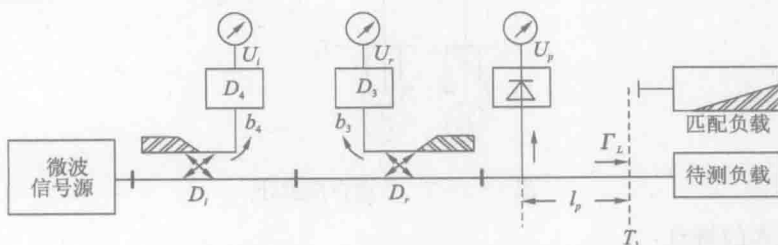


图 1-2-3 反射计-探针组合法测量复反射系数

矢量图及其对应的阻抗圆图如图 1-2-4 所示。 T_1 面接匹配负载, 调整探针灵敏度, 使它与入射检测装置 b_3 的灵敏度相等, 即 $|U_p| = |U_i|$ (此时匹配负载的 $U_r = 0$)。如图 1-2-4(a) 所示。

T_1 面接接待测负载, 则 $U_p = U_i + U_r$, 相对值 $u_p = U_p/U_i = 1 + \Gamma$, 而 $\Gamma = U_r/U_i$, 由矢量图可得 $|u_p|^2 = 1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma|\cos\psi$, 解出 $\cos\psi = \frac{|u_p|^2 - (1 + |\Gamma|^2)}{2|\Gamma|}$ 。由反射计测出 $|\Gamma|$, 再测出探针指示 $|u_p|^2$, 可求出负载的反射相位 $\psi_L = \pm\psi + \frac{4\pi l_p}{\lambda_g}$ 。如图 1-2-4(b) 所示。

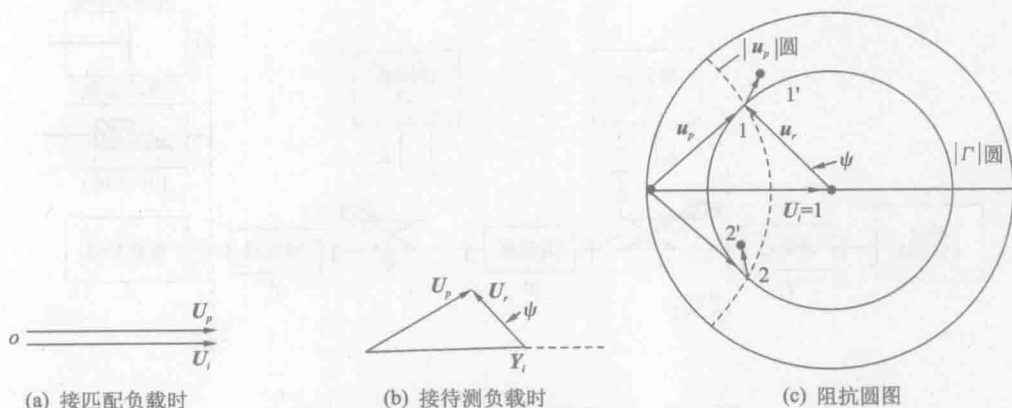


图 1-2-4 矢量图及其对应的阻抗圆图

为了判断正负, 把矢量图移入阻抗圆图, 如图 1-2-4(c) 所示, $|u_p|$ 与 $|\Gamma|$ 圆有两个交点 1 和 2。增加探针深度, 使探针容纳增加, 1 点和 2 点分别沿等电导圆方向移动到 1' 和 2', u_r 和 u_p 均增大, 此时取正; 反之取负。

为了解决上述反射计-探针组合法测量复反射系数出现的模糊度, 就产生了六端口反射计, 如图 1-2-5 所示。

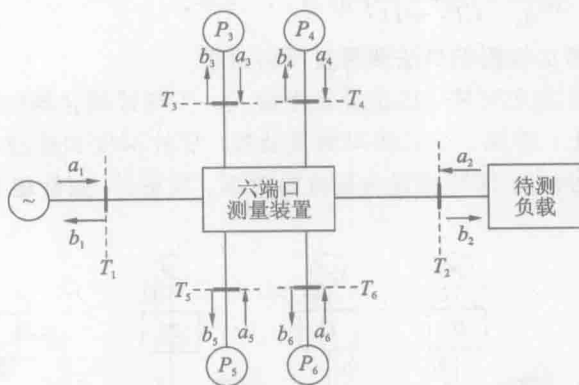


图 1-2-5 六端口反射计

六端口技术的特点:

(1) 除能测 Γ 外, 还可测净功率、 S 参数、衰减和相移。

- (2) 使用频率宽为 10 MHz~110 GHz。
 (3) 可实现精度测试。
 (4) 与自动网络分析仪相比设备简单, 易实现自动化测量。
 (5) 有自动网络分析仪的特点, 可以用软件来消除硬件的不完善性。

在图 1-2-5 中, P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 均是 a_2 、 b_2 的函数, 其计算式为

$$P_3 = |Aa_2 + Bb_2|^2 \quad (1.2.1)$$

$$P_4 = |Ca_2 + Db_2|^2 \quad (1.2.2)$$

$$P_5 = |Ea_2 + Fb_2|^2 \quad (1.2.3)$$

$$P_6 = |Ga_2 + Hb_2|^2 \quad (1.2.4)$$

假定四个功率指示中有一个与入射波 $|b_2|^2$ 成比例, 比如 P_4 , 则 $C=0$, 有

$$P_4 = |Db_2|^2 \quad (1.2.5)$$

那么有

$$|\Gamma - q_3|^2 = \left| \frac{D}{A} \right|^2 \frac{P_3}{P_4} \quad (1.2.6)$$

$$|\Gamma - q_5|^2 = \left| \frac{D}{E} \right|^2 \frac{P_5}{P_4} \quad (1.2.7)$$

$$|\Gamma - q_6|^2 = \left| \frac{D}{G} \right|^2 \frac{P_6}{P_4} \quad (1.2.8)$$

其中, $q_3 = -B/A$; $\Gamma = a_2/b_2$; $q_5 = -F/E$; $q_6 = -H/G$ 。

响应方程为

$$\begin{cases} P_3 = K_3 \frac{1}{|\Gamma_L - q_0|^2} \\ P_4 = K_4 \left| \frac{\Gamma_L - q_4}{\Gamma_L - q_0} \right|^2 \\ P_5 = K_5 \left| \frac{\Gamma_L - q_5}{\Gamma_L - q_0} \right|^2 \\ P_6 = K_6 \left| \frac{\Gamma_L - q_6}{\Gamma_L - q_0} \right|^2 \end{cases} \quad (1.2.9)$$

$$\text{设 } \begin{cases} W_4 = \frac{P_4}{P_3} \\ W_5 = \frac{P_5}{P_3} \\ W_6 = \frac{P_6}{P_3} \end{cases}, \text{ 则有}$$

$$\begin{cases} W_4 = K'_4 |\Gamma_L - q_4|^2 \\ W_5 = K'_5 |\Gamma_L - q_5|^2 \\ W_6 = K'_6 |\Gamma_L - q_6|^2 \end{cases} \quad (1.2.10)$$

式中, K'_i 、 q_i ($i=4, 5, 6$) 可由校准得到。由上述方程可解出 $\Gamma_L = |\Gamma_L| e^{j\varphi_L}$ 。

六端口反射计是测量 Γ_L 的固定装置, 是美国国家标准。

1.2.2 扫频测量系统

扫频测量具有直观、快速的特点,易于获得宽频带内的频率特性曲线,且便于调试。其测量精度目前已与点频测量相当,在加入自动校准后可以获得很高的测量精度,在研究和工程中已获得广泛使用。扫频测量的缺点则是功能受限于组成测量装置的外围元器件的宽频带特性。

扫频测量系统与点频测量系统在组成原则上是相同的,所不同的是它要求信号源频率能以直接方式扫动,而测量装置要有足够的带宽。

扫频测量系统一般包括三部分:微波稳幅扫频信号源、微波扫频测量装置和扫频指示设备,如图1-2-6所示。常用的测量装置有定向耦合器反射计和电阻桥反射计;常用的指示设备有比值计、静电偏转和磁偏转的光电显示器、光栅显示器、X-Y记录仪、微处理器控制扫频显示、打印、计算机等。现代设备的主要处理显示装置由计算机系统完成,例如网络分析仪、频谱分析仪等,测量使用的信号源、测量装置和处理显示装置完全集成在一套仪器系统中,对外只留有测试端口,使用非常方便。

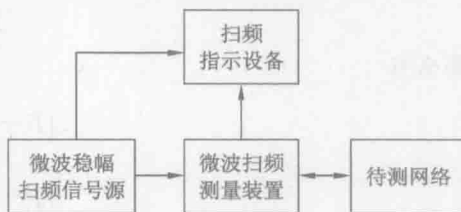


图 1-2-6 扫频测量系统方框图

1.3 微波频率测量

频率(或波长)是微波测量的基本参量之一。

因为自由空间波长 λ 和频率 f 之间的关系为 $\lambda = c/f$ (其中 c 为光速), 所以波长测量与频率测量是等效的, 但两者的测量方法却完全不同, 前者取决于对长度的测量, 后者取决于对时间的测量。在稳态情况下, 电磁波的频率不随媒质的性质而改变, 而波长却与媒质、传输线尺寸和波形有关, 因而频率测量具有普遍意义, 且显得更为重要。现在有了精确的光速测量值, 对于工作频率和波长而言, 在微波测量中可将两者统一为测量频率。但对于波导内传输电磁波的波导波长(相波长), 由于其与传输的模式有关, 因此需要用专用的测量线测定或进行换算。

频率是表征微波信号周期现象的一种参数。频率定义为微波电磁振荡每秒的周期数, 单位是赫兹(Hz)。它与周期 $T(s)$ 的关系为 $T=1/f$ 。测量微波频率的仪器称为微波频率计。

微波频率计按其工作原理可分为两类: 第一类利用谐振腔的谐振选频特性进行测量, 故称为谐振式频率计; 第二类利用超外差原理, 将微波信号直接与标准频率相比较进行测量, 称为外差式频率计。

下面介绍几种微波频率计的基本原理和使用方法。

1.3.1 谐振式频率计

根据谐振腔的谐振选频原理可知, 单模谐振腔的谐振频率取决于腔体尺寸, 利用调谐机构(常用活塞)对谐振腔进行调谐, 使之与待测微波信号发生谐振, 就可以根据谐振时调谐机构的位置来判断腔内谐振的电磁波的频率。这就是谐振式频率计的基本原理。