

高等学校教材

微波测量技术

董树义 编著



北京理工大学出版社

北京理

社

微波测量技术

董树义 编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书系统、详细地讲述了微波测量技术的基本测量原理、近代测量技术和主要测量方法的误差分析与提高精确度方法。其内容包括：微波网络特性、信号特性的测量与应用（晶体管S参数和介质参数测试）。在章节编排上，采用了循序渐进的新体系。全书共12章，依次为：引论、测量线技术、微波功率、频率和波长（含毫米波波长）与Q值、衰减与相位、标量、矢量网络分析仪、六端口、时域网络分析仪、频谱、噪声及介质参数测量。书末附有思考题与习题、参考实验题目和参考书与文献。

本书内容适度较宽，宜作电磁场与微波技术、雷达、通信和测量仪器等有关专业本科生的专业课程教材，还可供工厂、科研单位从事微波技术工作的有关科技人员参考。

微 波 测 量 技 术

董树义 编著

*

北京理工大学出版社出版
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防科工委印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 22.5 印张549 千字
1990年5月第一版 1990年5月第一次印刷
ISBN 7-81013-313-6/TN·18
印数：1—2400册 定价：4.80元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按机械电子工业部的工科电子类专业教材1986—1990年编审出版规划，由电磁场与微波技术教材编审委员会微波技术教材编审小组征稿、评选、推荐出版，责任编辑言华。

本教材由西安电子科技大学董树义担任主编，天津大学言华担任主审。

本课程的参考学时为60学时（或3学分）。其主要内容为：除第一章为引论外，分为两部分。第一部分为微波网络特性测量，包括标量、矢量网络参数和Q值测量，以及微波测量的某些应用（ANA法测量晶体管S参数和介质参数测量）；第二部分为微波信号特性测量，包括微波功率、微波频率与波长（含毫米波波长）、微波频谱和微波噪声测量。书末附有思考题与习题、参考实验题目和参考书与文献。在上述内容中，系统、详细地阐述了微波技术中常用的各种参数测量原理、技术和主要测量方法的误差分析与提高测量精确度的措施。并注意到国内外微波测量仪器与测量技术的新进展，选取了微波测量的基本内容和近代微波测量的新成就，去掉陈旧内容，以适应90年代微波技术学科的发展水平。如引入计算机辅助测试（CAT）的数学模型、误差模型和新的校准方法等；在章节编排上，采取了从简到繁、由易到难和突出重点的新体系，即从易于掌握的测量线技术入门，再以功率、频率与波长等逐渐展开所学内容，使较为零散的微波测量方法具有较强的理论性和系统性。并在总结教学经验和收集、整理近代新成就的基础上，尽力使本书具有循序渐进、富有启发性和便于自学的特点。对重点和难点内容，除单独形成章节之外，还采取逐步引入、分层讲解的方法，以尽量作到理论清晰、层次分明地将重点和难点内容讲深讲透。使用本教材时应注意：为贯彻理论联系实际和培养学生微波测量的基本技能，讲授者可按书末所列参考实验题目，结合本校实验情况编写“微波测量实验指导书”，以指导学生掌握基本测量原理和提高实际测试能力。在内容上应以功率、频率（与波长）和标量、矢量网络分析仪为重点。课堂教学应侧重讲解测量原理和方法。有条件的最好辅以仪器和图例幻灯片进行讲解。学生可通过复习、作业、及实验课进一步掌握本课程之内容。

本教材由董树义编写全稿。在书稿审订过程中，许多同志都为本书提出不少宝贵意见，这里表示诚挚的感谢。在收集微波仪器有关资料时，得到同行们鼎力相助，在此一并感谢。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

一九八八年十一月十二日

目 录

第一章 引 论

1.1 微波测量的任务	1
1.2 微波测量参数的分类及其有关术语	2
1.2-1 微波测量参数的分类	2
1.2-2 微波网络特性测量中的有关术语	4
1.3 微波测量发展动态简述	5

第二章 测量线技术

2.1 测量线结构简介	7
2.1-1 波导式测量线	7
2.1-2 同轴式测量线	8
2.2 微波测量系统的组成	9
2.3 单口网络驻波比与阻抗测量	10
2.3-1 测量线的调整原理及方法	11
2.3-2 探针检波器的晶体定标及直接法测量驻波比	14
2.3-3 等指示度法测量大驻波比	17
2.3-4 功率衰减法测量驻波比	17
2.3-5 单口网络阻抗测量	18
2.4 双口网络插入驻波比及无耗网络参数测量	20
2.4-1 插入驻波比测量	20
2.4-2 无耗网络参数测量及其 CAT	23
2.4-3 多口微波网络参数的测量要点	28
2.5 测量线误差源及提高测量精确度的方法	29
2.5-1 测量线误差源	29
2.5-2 提高测量线测量精确度的方法——误差模型法	30
2.6 微波信号源驻波比测量	33
2.7 测量线 CAT 技术简介	34
2.7-1 微机控制的自动测量线简介	34
2.7-2 多探针技术的 CAT 简介	35

第三章 微波功率测量

3.1 概述	38
3.1-1 微波功率测量的一般电路及功率方程式	38
3.1-2 功率的度量单位	39
3.1-3 功率计的基本框图与分类	40

3.2 微波晶体检波器	41
3.2-1 微波晶体检波器原理	42
3.2-2 晶体检波器（或功率座）驻波比的测量	45
3.3 微波小功率测量原理	46
3.3-1 测热电阻性能简介	46
3.3-2 测热电阻座（功率探头）	48
3.3-3 电桥法测量微波小功率原理	49
3.3-4 热电偶法测量微波小功率原理	53
3.3-5 量热计法测量微波小功率原理	55
3.4 微波大、中功率测量	56
3.4-1 扩展小功率计量程法	57
3.4-2 微波大、中功率计原理	57
3.5 微波脉冲功率测量简介	59
3.6 数字微波功率计指示原理	60
3.7 微波功率测量误差分析	62
3.7-1 功率座的有效效率及其校准方法	62
3.7-2 微波功率测量的失配误差分析	65

第四章 微波频率、波长及Q值测量

4.1 微波频率测量	67
4.1-1 概述	67
4.1-2 频率标准介绍	68
4.1-3 有源比较法的测频基本原理	71
4.1-4 频率扩展技术与稳频	72
4.1-5 微波外差式频率计基本原理	77
4.1-6 微波数字频率计基本原理	79
4.1-7 确定微波频率的准确度与稳定度	84
4.2 微波与毫米波波长测量	87
4.2-1 谐振式波长计结构	87
4.2-2 波长计的连接电路	88
4.2-3 波长计的等效电路参数	89
4.2-4 波长计的校准方法	90
4.2-5 毫米波波长测量	91
4.3 谐振腔Q值的测量	98
4.3-1 功率传输法测量Q值原理	99
4.3-2 功率反射法测量Q值原理	100
4.3-3 阻抗法测量Q值原理	101
4.3-4 扫频法（网络分析仪法）测量Q值原理	102
4.3-5 暂态法测量Q值原理	103
4.3-6 Q值测量的误差来源	105
4.4 波长计法测量频率的误差分析	106

第五章 衰减与相位移的分项测量

5.1 衰减测量	110
5.1-1 衰减的有关定义	110
5.1-2 直接测量衰减——功率比法	113
5.1-3 替代法测量衰减原理	115
5.1-4 衰减测量的误差源和失配误差分析	121
5.2 相位移的测量	123
5.2-1 相位移的有关定义	123
5.2-2 测量线法测量相移原理	124
5.2-3 替代法测量相移原理	127
5.2-4 微波数字相位计原理	129
5.2-5 相移测量中的误差源及失配误差分析	132

第六章 微波标量网络分析仪原理

6.1 反射计工作原理	135
6.1-1 定向耦合器反射计工作原理	135
6.1-2 提高点频反射计测量精确度的方法	143
6.1-3 电桥反射计	149
6.2 扫频测量系统的组成及稳幅原理	152
6.2-1 扫频测量系统的组成及扫频信号源	152
6.2-2 扫频信号源程控方法	156
6.2-3 微波信号源稳幅原理	164
6.2-4 扫频幅度分析仪	167
6.3 标量反射参数扫频测量原理	171
6.3-1 双定向耦合器扫频反射计测量原理	172
6.3-2 单定向耦合器扫频反射计测量原理	173
6.3-3 扫频反射计误差分析及减小误差的方法	174
6.4 标量传输参数扫频测量原理	178

第七章 微波网络分析仪的原理与应用

7.1 引言	180
7.2 微波网络分析仪测量原理	180
7.2-1 幅相接收机方框图	180
7.2-2 反射参数测量原理	182
7.2-3 传输参数测量原理	185
7.2-4 四个S参数的测量装置及误差模型	187
7.3 微波自动网络分析仪(ANA)	189
7.3-1 引言	189
7.3-2 微波自动网络分析仪测量原理	190
7.3-3 典型测量结果	195
7.4 微波网络分析仪的应用——晶体管S参数测量原理	195

7.4-1 引言	195
7.4-2 网络分析法测量晶体管 S 参数的一般原理	197
7.4-3 ANA 法测晶体管 S 参数的校正方法	200

第八章 六端口微波网络分析仪原理

8.1 六端口反射计工作原理	204
8.1-1 六端口反射计的几何模型和设计准则	204
8.1-2 六端口反射计的数学模型	208
8.1-3 六端口反射计校准原理	213
8.1-4 六端口反射计实际电路	218
8.2 六端口网络分析仪原理	221
8.2-1 单六端口自动网络分析仪	221
8.2-2 双六端口测量网络参数原理	222
8.2-3 双六端口网络分析仪校准原理	224

第九章 时域法测量微波网络参数原理

9.1 反射参数 (Γ , S_{11} , S_{22}) 的时域测量	231
9.1-1 基本原理	231
9.1-2 显示波形与待测负载的关系	232
9.1-3 距离分辨力	236
9.2 传输参数 (S_{21} , S_{12}) 的时域测量	236
9.2-1 基本原理	236
9.2-2 兼测反射参数的测量电路	237
9.2-3 波形响应与变换	238
9.3 取样示波器基本原理	239
9.4 时域自动网络分析仪 (TDANA)	249
9.4-1 网络特性的频域表示式	249
9.4-2 时域自动网络分析仪 (TDANA) 方框图	250
9.5 快速傅里叶变换 (FFT)	251

第十章 微波信号频谱分析

10.1 微波频谱分析仪工作原理	254
10.1-1 引言	254
10.1-2 扫频超外差式频谱分析仪的工作原理	256
10.1-3 频谱分析仪的稳态分辨力	258
10.1-4 扫频速度对分辨力的影响及扫频速度的选择	261
10.1-5 扫频速度对灵敏度和分辨力的影响	265
10.2 微波频谱分析仪的应用及误差分析	268
10.2-1 频谱分析仪的应用	268
10.2-2 频谱测量误差分析	281

第十一章 微波噪声系数测量

11.1 噪声系数定义及其测量基本原理	283
11.1-1 噪声系数定义	283
11.1-2 测量噪声系数的基本原理	285
11.2 噪声发生器	287
11.2-1 饱和二极管噪声发生器	287
11.2-2 气体放电管噪声发生器	290
11.2-3 固态噪声发生器	291
11.3 噪声系数测量方法及其误差分析	293
11.3-1 Y系数法及其误差分析	293
11.3-2 噪声系数的自动测量及扫频测量	297
11.4 调幅调频噪声测量原理	299
11.4-1 调幅噪声测量原理	299
11.4-2 调频噪声测量原理	299
11.5 频谱分析仪法测量噪声	300

第十二章 介质参数测量

12.1 引言	305
12.1-1 介质参数定义及其影响因素	305
12.1-2 介质参数的相关可测量	306
12.1-3 介质材料的取样方法	308
12.2 波导法测量介质参数	309
12.2-1 介质样品的双口等效网络及 ϵ_r 的测定公式	309
12.2-2 两点法测量介质参数	311
12.2-3 与介质样品位置或长度无关的介质参数测量方法	317
12.2-4 高损耗材料介质参数的测量——无限取样法(长样品)	322
12.2-5 波导法测量介质参数的误差源	323
12.2-6 铁磁材料测量方法	325
12.3 谐振腔法测量介质参数	327
12.3-1 H_{01} 腔测量盘形介质样品	327
12.3-2 微扰法测量介质参数	329

思考题与习题

参考实验题目

参考书与文献

第一章 引 论

1.1 微波测量的任务

微波是波长很短的电磁波。一般所指的微波波段是从 300MHz 至 300GHz 之间的电磁波谱(即波长从 1m 至 1mm)。在微波波段之内又划分为分米波(0.3~3GHz)、厘米波(3~30GHz)和毫米波(30~300GHz)。由于毫米波频段的高端在技术上已与一般微波频段有较大不同,所以又把毫米波的高端归入亚毫米波段(1~0.1mm)。在亚毫米波段中,大约从 0.3mm(1×10^3 GHz)至 0.01mm(3×10^4 GHz)又称为远区红外线,如图 1.1-1 所示。整个微波波段,作为无线电波谱的高频端,大致可以概括为微波波段和超微波波段两部分,并与红外光谱相衔接。常用微波频段名称见表 1.1-1。

表 1.1-1 常用微波频段名称

频段代号	频率范围(GHz)	频段代号	频率范围(GHz)
UHF	0.3—1.12	Ka	26.5—40.0
L	1.12—1.7	Q	33.0—50.0
LS	1.7—2.6	U	40.0—60.0
S	2.6—3.95	M	60.0—75.0
O	3.95—5.85	E	60.0—90.0
XC	5.85—8.2	F	90.0—140.0
X	8.2—12.4	G	140.0—220.0
Ku	12.4—18.0	R	220.0—325.0
K	18.0—26.5		

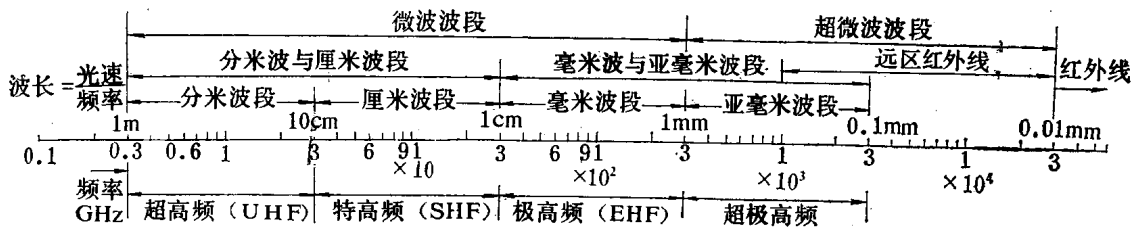


图 1.1-1 微波波谱

人们掌握微波技术这一学科,意味着不仅要解决这个波段的理论问题,还要解决一系列技术问题,如电磁波的产生、放大、发射、接收、传输、控制和测量等。在这些工作中,微波测量是进行量值测定并保持统一的一门专门技术,它与微波理论、技术共栖交融,是必不可少的组成部分。其重要性可比喻为测量是科学的眼晴,没有测量的科学是盲目的科学。因此,在某种意义上,没有微波测量就没有今天高度发展的微波理论、技术与应用。故微波测量的主要任务是:(1)利用当前已有的微波技术装备(通常是使用当前的先进技术去专门制

造)组成合乎要求的测量装置和仪器;(2)利用当前已有的微波理论与技术,研究符合实际的测量方法(包括研究新的测量仪器和先进的测量方法),而新的、日趋完善的测量方法又推动微波理论与技术的发展;(3)在各项微波测量中必须分析、尽量排除各种误差,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赖性;(4)要完成上述任务,还需要开展微波计量工作,使在微波量值的统一性和法制性上给予保证。也就是要使用当前最先进的理论与技术,由国家计量机关制作各项微波量值基准和各级传递标准,从而保证微波量值的统一。

本课程的任务,主要涉及前三项,即学习微波技术中基本参数的测量方法和测量系统的基本原理,以掌握微波测量的基本理论与技能。

1.2 微波测量参数的分类及其有关术语

在微波技术与工程中,需要测量的微波参数有很多个。本课程不可能也不必要一一阐述。为此对它们归纳分类,以便学习掌握。

1.2-1 微波测量参数的分类

微波测量参数有各种分类法,就其测量内容可以把它们概括为“微波网络特性”和“微波信号特性”两类。

微波网络特性(含有源网络)是指那些根据微波网络的等效概念,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结等效为多口网络。描述这些网络外部特性的电参数称为网络参数。为测量这些参数,将多口网络化为双口网络测试,而双口网络的反射参数又可化为单口网络来测试。因此,微波网络特性测试包括单口和双口网络参数的测试。

在理论分析和工程设计上,常用散射参数来表示双口微波网络的电特性(图1.2-1),即

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (1.2-1)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (1.2-2)$$

其中 a_1 、 a_2 为网络的归一化电压内向波; b_1 、 b_2 为外向波; S_{11} 、 S_{22} 为反射参数, S_{21} 、 S_{12} 为传输参数,对于互易网络有 $S_{21} = S_{12}$ 。

对单口网络常用反射系数 Γ 表示其电特性(图1.2-2),即 $\Gamma = b/a$,也用与 Γ 有直接关系的归一化阻抗 $z = (1 + \Gamma)/(1 - \Gamma)$ 来表示。当在双口网络的终端接上匹配负载时,又可以像测量单口 Γ 一样地测量其反射参数 S_{11} 或 S_{22} 。

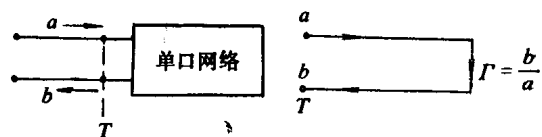
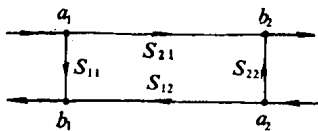
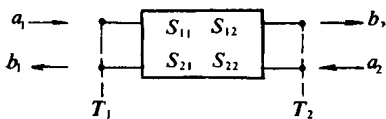


图1.2-1 双口网络散射参数及其信流图

图1.2-2 单口网络反射参数及其信流图

综合上述五个参量，习称为阻抗（复反射系数）与网络参数（含有源网络）。进一步又划分为反射参数（ 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，常用反射系数的模值 $|\Gamma|$ 或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 $\rho=(1+|\Gamma|)/(1-|\Gamma|)$ ）和矢量反射参数（ Γ 、 S_{11} 、 S_{22} 及 Z ）测量。同理，也把传输参数分为标量传输系数（ $|S_{21}|$ 、 $|S_{12}|$ 及衰减 $A=-20\lg|S_{21}|$ ）和矢量传输系数（ S_{21} 、 S_{12} ）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幅角再分为两个分项指标，即衰减和相位移（ $\Psi_{21}=\arg S_{21}$ ）。当然，在很多情况下，仍需要全面测定其矢量网络参数。因此，针对测量这些复量参数时，有分有合的实际情况，再考虑到数学上的便利，本书把微波网络参数测量分散到若干章节讲授，如表1.2-1的栏目I所示（其中包含Q值测量和两项应用）。这些参数的测量是依靠适当的测量装置来实现的，结合当前国内外所使用的测量装置，特别是国内情况，将在各章节分别讲述。

关于微波信号特性的测量，有功率、频率（波长）、波形、频谱和噪声等。本书将在各章讲述，如表1.2-1的栏目II所示。

表1.2-1 微波网络特性及信号特性测量参数分类表

I. 微波网络特性测量	标量参数测量（含于“3”）	1	标量反射参数（回波损失或驻波比）的测量 (2.3-2~2.3-4、2.4-1、6.1~6.3节)	$ \Gamma $ 、 $ S_{11} $ 、 $ S_{22} $ 或 $\rho=(1+ \Gamma)/(1- \Gamma)$ 、 $\rho_{11}=(1+ S_{11})/(1- S_{11})$ 、 $\rho_{22}=(1+ S_{22})/(1- S_{22})$ 、 } 插入驻波比 $RL=-20\lg \Gamma $ 或 $-20\lg S_{11} $ 、 $-20\lg S_{22} $
		2	标量传输参数（衰减）的测量 (5.1、6.4节)	$A=-20\lg S_{21} $
	矢量参数测量	3	阻抗（复反射系数）与复网络参数的测量（全面测定）(2.3-5、2.4-2节；第7、8、9章)	Γ 、 S_{11} 、 S_{22} 、 S_{21} 、 S_{12} 或 $z=(1+\Gamma)/(1-\Gamma)$
		4	相位移测量 (5.2节)（含于“3”的测量中）	$\Psi_{21}=\arg S_{21}$
	Q值测量（4.3节）			
应用	(1) ANA法测量晶体管S参数(7.4节)；(2) 测量介质参数(第12章)			
II. 微波信号特性测量	微波功率测量（第3章）； 微波频率、波长测量(第4.1和4.2节)； 微波频谱测量（第10章）； 微波噪声测量（第11章）			

微波测量方法很多，特别是近代微波测量方法迅速发展，不断增添新成就，但多分散在刊物文献上。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，采取了循序渐进的新体系编制章节。即：除第一章为引论外，首先以测量线技术为入门。测量线装置不但易得，而且易于在传输线理论上引入微波测量的基本概念、理论和方法。然后进入微波功率，频率（波长）与Q值，衰减与相位移，标量、矢量网络分析仪，六端口、时域网络分析仪，频谱分析仪，噪声和介质参数测量，使

内容逐步深入和展宽。其中较大的重点内容为功率、频率(波长)和标量、矢量网络分析仪。在重点内容之间插讲衰减与相位移的分项测量,一为实用,二为后面提供准备,同时也为重点内容提供波浪式起伏的分布方法。Q值测量放在与它联系较为紧密的波长计之后。为引导实际应用,选入了晶体管S参数测试和介质参数测试。故本书内容有较宽的适度,可供有关专业的不同教学要求进行取舍。

1.2-2 微波网络特性测量中的有关术语

一、反射参数术语: 当一个双口网络在 T_2 面端接无反射负载时(图1.2-3a),它与单口网络(图1.2-3b)相同,在输入传输线上会由于不匹配而产生反射波,再与入射波合成为驻波,其相对电压驻波分布为

$$v = [1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos(\Psi - 2\beta D)]^{1/2} \quad (1.2-3)$$

其中 $|\Gamma|$ 和 Ψ 分别为 T_1 面反射参数的模和相角, D 为距 T_1 面向源端离开距离, $\beta = 2\pi/\lambda_g$ 为传输线相移常数, λ_g 是传输线波长。

传输线上的驻波状态决定于网络的反射特性,用 $|\Gamma|$ 或 ρ 表征其形状,用相角 $(\Psi - 2\beta D)$ 表征其位置关系。驻波比定义为

$$\rho = |v_{\max}| / |v_{\min}| \quad (1.2-4)$$

在实际测试中,常使用标准衰减器法测量 $|\Gamma|$ 或 ρ ,故常用回波损失和分贝驻波比表示之,它们的定义式分别为

$$RL = -20 \lg |\Gamma| \text{ (dB)} \quad (1.2-5)$$

$$\rho_{\text{dB}} = 20 \lg \rho \text{ (dB)} \quad (1.2-6)$$

$|\Gamma|$ 、 RL 、 ρ 和 ρ_{dB} 之间关系如图1.2-3c所示。回波损失表示反射波损失的大小,当 $RL \rightarrow \infty$ 时,说明网络的反射波为零,即匹配状态。

二、传输参数术语: 由式(1.2-2)和图1.2-3a知,当双口网络输出端接匹配负载时,有

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} = |S_{21}| e^{j\psi_{21}} \quad (1.2-7)$$

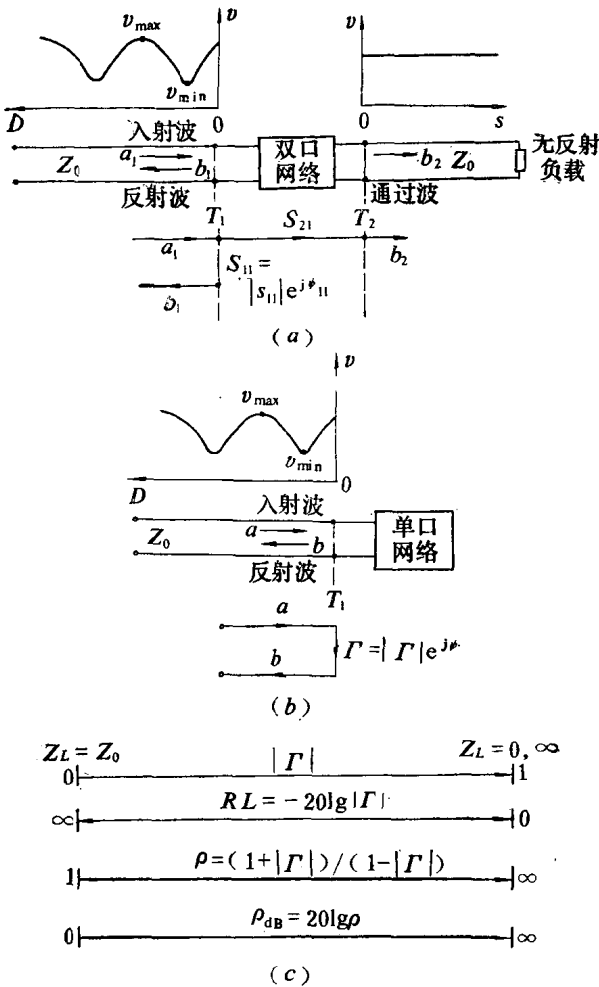


图1.2-3 驻波分布及其表示方法
(a)双口网络情况;(b)单口网络情况;
(c) $|\Gamma|$ 、 RL 、 ρ 、 ρ_{dB} 之间关系

定义衰减 $A = -20 \lg |S_{21}| \text{ (dB)}$, 而 Ψ_{21} 为传输系数幅角,即相位移。它们的单项测量习称为衰减测量和相位移测量。

1.3 微波测量发展动态简述

19世纪末期建立了麦克斯韦方程组和电磁场理论(麦克斯韦于1873年发表“电磁学通论”),预示和推断出用金属容器(空腔谐振器与有源器件相结合)激发,并由空金属管传输其电磁波的可能性;后来约于1933年在实验室中发现了空金属管能够传输电磁波^[7,57]。这是微波学科的诞生时期。可见,微波学科从诞生起就有实验研究的特点。说明没有实验结果的科学,不是真正的科学。随着微波学科的发展,其中的微波测量理论和技术也不断丰富和提高。

目前的微波测量仪器由于采用了当前的先进技术,如频率合成技术、取样技术、宽带扫频、数字程控、计算机辅助测试(CAT)技术等,使信号源的扫频带宽和测量仪器的动态范围大大提高,使微波测量的智能化、自动化和数字化取得很大进展,将测量精确度提高到新的水平。

微波测量技术的发展与微波仪器的发展是休戚相关的。近代微波仪器的发展趋势是宽带覆盖、自动化、智能化和使自身带有接口^[119],不带接口的仪器不能算是先进的仪器。如频谱分析仪HP71300A的工作频率可扩展到2.7~325GHz;泰克(Tektronix)公司的492A覆盖到50kHz~325GHz,并在人工智能上具有产生带宽模式、清单式可选信号过程、信号跟踪、噪声归一化等多种模式,带有GP-IB接口线的程控模本,能使程序简化并保证测量的重复性。国产微波仪器近年来发展很快,如程控微波信号源QH1350型,4个插件可覆盖0.01~18GHz,配以程控板QH1350Y1可组成自动扫频信号源。该程控板是电子仪器标准接口(与IEEE-488接口相兼容),它与测量装置和计算机相连接可组成需要的自动测量系统。例如配接定向耦合器和标量网络分析仪QH3610,则可组成自动标量网络参数测量系统。

在自动测量系统的发展过程中,已逐渐形成一个专门课题“计算机辅助测试(CAT)”^[118]。即研究如何由控制器、接口总线、数据获取系统、计算机及其外围设备等组成具有智能作用的自动化测量系统。其中包括两个分支,即微波(或射频)电子仪器及其CAT和微波(或射频)测量技术及其CAT^[11]。前者研究电子仪器结构、控制、数据获取、智能和测试接口技术等;后者研究提高测量系统精确度的数学模型、误差模型、校准方法等。这两方面的成就正在使微波测量技术在软件的支持下得到高精度、快速的自动化测量系统,并将得到进一步发展。

CAT技术的发展,首先使阻抗与网络参数的测量取得重大成就,并在迅速发展。自动网络分析仪(ANA)已将测量精确度提高到、甚至超过手动测量水平^[53,59,27],其测量速度比常规测量快50~150倍,一般8小时的常规工作量,它可在3~5分钟内完成。六端口测量技术自1972年问世以来,引起微波测量领域人士的广泛关注^[60],其测量原理和方法适用于低频至毫米波以至光频范围。与自动网络分析仪(ANA)相比较,在体积上较小,在成本上较低,而测量精确度和功能完全可以和网络分析仪相媲美,经过这十多年的发展,仍是方兴未艾之时。这两者都是承认测量装置硬件的不完善性,由软件来修正其测量误差。阻抗与网络参数测量方法的另一个发展方向是时域反射计(定位反射计),它能将待测件的时域特性直观地显示在荧光屏上,又能通过快速傅里叶变换转变为频域特性^[61];也可以把频域测量瞬时地转变为时域测量,利用反卷积技术可以把时域反射计距离分辨力提高到一个波导波长^[62]。

阻抗与网络参数的测量在微波测量中占有重要地位。这是因为阻抗与网络参数的计量与功率、衰减、相移、晶体管 S 参数、介质材料等参数的测量有着非常密切的关系,例如 ANA 除能测量阻抗与网络参数外,还能测量功率探头的有效效率、衰减和相移等等参数,也能把频域测量变换到时域测量。

CAT 技术还用于常规测量。例如使用计算机来控制信号源频率(图1.3-1)。它是按编制程序由计算机调整信号源频率,再由频率计测量之,并将该频率的测量结果经 A/D 变换后,

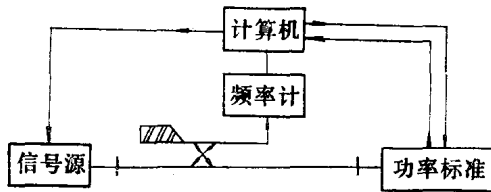


图1.3-1 用程控信号源的频率去测量功率标准参数

送入计算机。计算机根据指定频率和测量频率之差算出修正量,反馈到信号源,来修正信号频率以达到指定频率点上。这个控制过程大约每分钟取样一次数据,并由计算机修正一次^[63,64];这种测量系统的频率稳定度能满足功率测量的要求;它没有锁相反馈环,不存在失锁问题。因此测试者可以在星期五下班以后,

由计算机自动控制继续操作,到星期一上班时这个系统仍在正常工作,并获取大量测试数据。此外,对常规测量方法,若与小型计算机接口,也给测试工作带来很大方便,如测量线等,在所用频带内,测出反射系数的频域特性,借助阻抗圆图可计算出待测件的时域特性^[65]。

近年来国内外毫米波技术的研究与应用又一次蓬勃兴起,其中毫米波亚毫米波测量也获得迅速进展。国外的微波电子仪器多已覆盖到毫米波段。国内的毫米波研究工作虽然起步较晚,但近年来发展较快,毫米波元、器件开始进入国际市场^[119]。所以毫米波测量技术将是微波测量的一个发展方向。

第二章 测量线技术

在驻波比、阻抗与网络参数测量中，测量线是一种最常用的、很灵活的微波仪器，有微波万用表之称。它可以测量单口网络，也可以测量双口网络和多口网络。近期虽有新型测量方法不断出现（见第七、八章），但由于测量线的成本低、方便灵活、原理清晰，易于入门，因此，它在微波测量中仍占有重要地位；近年来毫米波技术兴起，国产测量线已达3mm波段。由于计算机的蓬勃发展，使测量线法在机助下，能得到校正^[52,70]和精密拟合^[19,74,75,71]的测量结果。目前国内已有自动测量线出现。

本章主要讲述：测量线调整、大中小驻波比测量、阻抗及网络参数的测量原理和方法，并介绍测量线计算机辅助测试（CAT）的部分数学模型和测量线的CAT技术。

2.1 测量线结构简介^[21,5,3,13]

测量线的种类按传输线的结构来分有波导式、同轴式和平板式三种，本节介绍前两种结构，以便正确使用。

2.1-1 波导式测量线

波导测量线如图2.1-1所示。它包含三个部分：开槽线、耦合指示器和传动机构。

一、波导开槽线：它是在矩形波导宽边的中央开一条严格平行于纵向轴线的长条槽缝构成的，是待测元件连接的一段波导传输线。它的接入不应该对待测元件的性能产生任何影响。从这点出发，对开槽线的制造提出机械加工要求，并经过专门制造而成。槽缝两端作成渐变形状是为减小槽端反射之用，也有作成阶梯变换段的。

二、耦合指示机构：它由探针、调谐腔体、晶体检波器和指示设备构成（图2.1-2）。探针通过波导的槽缝伸进波导内，与所在位置的电场发生耦合（图2.1-3），在探针上产生与该处电场强度成比例的感应电动势，并经过探针的调谐腔体送至晶体检波器，由晶体检波器把这个感应电动势的能量转换为直流电流或低频电流，用微安计或光点检流计或测量放大器来指示。

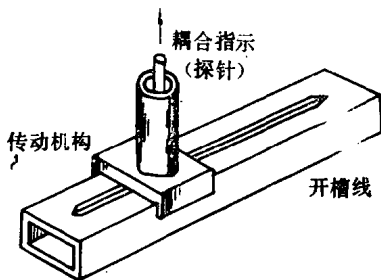


图2.1-1 波导测量线结构示意图

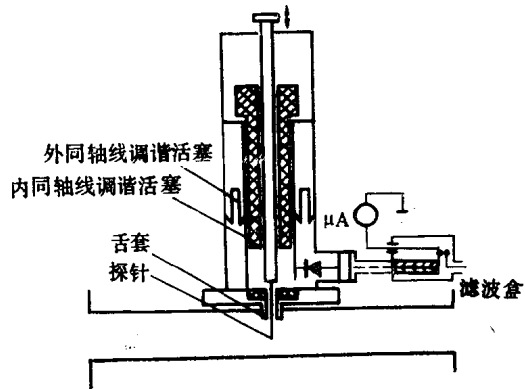


图2.1-2 探针指示机构示意图