

高等学校教材

微波测量

西北电讯工程学院 董树义 编



国防工业出版社

内 容 简 介

本书从微波测量基本参数的常用性、理论性和便于学习的角度，讲述微波技术基本参数的测量原理。第一章为引论；第二~八章为微波阻抗与网络参数的测量（驻波比、反射系数、阻抗与网络参数、六端口技术及时域法测量）；第九、十章为微波信号特性（功率和频率）的测量；第十一、十二章为衰减与相位的分项测量。全书共计十二章，书末附有“思考题与习题”和“参考书与文献”。

读者对象，可作为微波技术或无线电类有关专业本科高年级学生教材。也可供工厂、科研单位从事微波技术有关的科技人员参考。

微波测量

西北电讯工程学院 董树义 编

责任编辑 耿新暖

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张17 393千字

1985年12月第一版 1985年12月第一次印刷 印数：0,001—4,200册

统一书号：15034·3019 定价：3.50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工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，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

本教材系由电子工业部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评选审定，并推荐出版。

该教材由西北电讯工程学院董树义担任主编，北京工业学院汤世贤教授担任主审。编审者是依据微波技术教材编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

本课程的参考教学时数为50学时，其主要内容为：根据微波测量基本参数的常用性、讲解便利性，即从简到繁、由易到难及突出重点的原则，循序地讲述微波技术中各种基本参数的测量原理。其内容除第一章为引论外，其余大体上可分为三大部分。第一部分为驻波比、阻抗（复反射系数）与网络参数测量原理（第二～八章）。在这一部分中按待测参数的性质又归纳为两种情况，其一为标量反射参数的测量，即驻波比和反射系数模（或回波损失）的测量（第二、四、五章），主要讨论测量线法、反射计法和扫频法测量反射系数模值等参数的原理；其二为阻抗和网络参数的全面测定（第三、六、七、八章），主要讨论测量线法测量微波阻抗和网络参数及网络分析仪法测量全部散射参数的原理和方法；对六端口测量技术和微波网络参数的时域测量法也分别做了介绍。第二部分为微波信号特性的测量（第九、十章），主要讨论微波功率和频率（波长）的测量原理，并对谐振腔 Q 值的测量原理也在此予以适当讨论。第三部分为衰减与相位的分项测量原理（第十一、十二章）。按微波测量参数的概括分类法，第一、三部分合在一起为“微波网络特性测量”，第二部分是“微波信号特性测量”的常用内容。为了教学上的灵活性和便利性，在章次编排上作了适当调整，但对所讲述的各种参数之间的相互关系亦应有概括性的了解，以利于学习中的联想和归纳。本书内容的选择在微波测量领域里都是最基本和最主要的内容，对每种参数的测量方法的介绍都注意选择其中最基本和目前最常用的方法；对先进技术亦给予适当重视或介绍。在理论与实际结合方面，重点在讨论测量方法所依据的原理之后，一般都略述其必要的测量设备和操作步骤，做出具体的误差分析，有的在书末附有适当思考题或习题，以巩固概念和有助于提高实际思考能力或练好基本功。使用本教材时应注意：在上述三个部分中应以第一、三两部分为重点，其次是第二部分。请注意这个主次关系，在实施顺序上也可以把第二部分的内容提前讲述。由于每章内容基本上是互相独立的，还可以根据不同教学要求和具体情况选取或删减某些章节，或调换其次序。课堂教学应重点讲清测量方法和原理，对具体仪器设备和测量步骤仅作重点和难点提示，再由学者通过复习、作业并结合实验指导书通过实验教学进一步掌握之，以使测量的理论教学和实验教学密切结合起来。本书对于过去使用等效电路的分析方法一般改用信流图法分析，较为简便和形象。

本教材由董树义编写全稿。主审者为本书提出许多具体而宝贵意见，这里表示诚挚的感谢；并表示对本书的前身《微波测量原理》^[13]一书提出宝贵意见的所有同志一并感谢。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

一九八四年七月

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 3
- 1.3 微波测量发展动态简述 7

第二章 测量线法测量驻波比

- 2.1 测量线结构简介 9
- 2.2 测量系统的组成及测量线的调整 12
- 2.3 晶体定标与直接法测量驻波比 20
- 2.4 等指示度法测量驻波比 22
- 2.5 功率衰减法测量驻波比 23
- 2.6 滑动小反射负载法测量驻波比 24
- 2.7 S曲线法测量驻波比 26
- 2.8 微波信号源驻波比的测量方法 31
- 2.9 晶体检波器驻波比的测量方法 32
- 2.10 测量线误差分析及其检验方法 33

第三章 测量线法测量阻抗
与网络参数

- 3.1 测量线法测量输入阻抗 37
- 3.2 测量线法测量网络参数 41

第四章 反射计法测量反射系数

- 4.1 基本反射计工作原理 53
- 4.2 双定向耦合器调配反射计原理 62
- 4.3 单定向耦合器调配反射计原理 65
- 4.4 调配反射计调配不完善误差分析 66
- 4.5 电桥反射计法测量反射系数介绍 70
- 4.6 反射计法测量复反射系数的
解决途径 73

第五章 标量反射参数的扫频测量

- 5.1 扫频测量系统的组成及
稳幅环路的作用 77
- 5.2 扫频反射计法测量 $|\Gamma|$

及其误差分析 84

- 5.3 扫频测量线法测量驻波比 91

第六章 微波网络分析仪的
原理与应用

- 6.1 引言 95
- 6.2 微波网络分析仪测量原理 95
- 6.3 微波自动网络分析仪(ANA)介绍 106

第七章 六端口测量技术介绍

- 7.1 六端口电路的几何模型及
设计准则 113
- 7.2 六端口电路的数学模型 119
- 7.3 六端口反射计校准方法举例 125
- 7.4 六端口自动网络
分析仪(SPANA)介绍 128

第八章 微波网络参数的
时域测量法简介

- 8.1 反射参数的时域测量
(Γ 、 S_{11} 、 S_{22}) 133
- 8.2 传输参数的时域测量 (S_{21} 、 S_{12}) 140
- 8.3 时域自动网络分析仪
(TDANA)简介 143

第九章 微波功率测量

- 9.1 概述 146
- 9.2 微波晶体检波器 149
- 9.3 微波小功率计原理 156
- 9.4 微波中、大功率计原理 174
- 9.5 功率测量的误差源、功率方程式
和失配误差 177
- 9.6 微波功率计的校准方法简介 183

第十章 微波频率、波长及Q值测量

- 10.1 微波频率测量 187
- 10.2 微波波长测量 201

10.3	谐振腔Q值的测量	212
------	----------------	-----

第十一章 衰减测量

11.1	定义	221
11.2	直接测量衰减——功率比法	225
11.3	替代法测量衰减原理	227
11.4	衰减测量的扫频技术	235
11.5	衰减测量中的误差源和 失配误差分析	236

第十二章 相位移的测量

12.1	定义	240
------	----------	-----

12.2	测量线法测量相移原理	242
------	------------------	-----

12.3	替代法测量相移原理	245
------	-----------------	-----

12.4	变换到低频测量相移及 数字相位计简介	248
------	-----------------------------	-----

12.5	相移测量中的误差源及 失配误差分析	251
------	----------------------------	-----

思考题与习题	253
--------------	-----

附录	261
----------	-----

附录一 式(2.2-8)的推导	261
-----------------------	-----

附录二 式(2.10-10)的推导	262
-------------------------	-----

参考书与文献	263
--------------	-----

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波段有较大不同，所以又把毫米波的高端归入亚毫米波段。在亚毫米波段大约从 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，大致可以分为微波波段和超微波波段两部分，并与红外光谱相衔接。目前我们所学习的微波理论与技术，所在波段主要是 0.3~40GHz。常用波段名称见表 1.1-1^[21]。

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，是微波学科中必不可少的组成部分。在某种意义上没有测量就没有学科。因此微波测量的主要任务是：

（1）利用当前已有的微波技术条件（通常要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与先进的测量方法），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、排除各种误差，实现必要的测量精确度，从而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以保证。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做出微波各项量值基准和各级传递标准，从而保证微波量值的统一。

作为本课程的任务，主要涉及前三项。通过学习微波技术中最基本参数的测量方法，来掌握微波测量的基本原理与技术。

表 1.1-1 常用微波波段名称

名 称	频 率 GHz	名 称	频 率 GHz
P	0.5~1.0	X	8.2~12.4
L	1.0~2.0	Ku	12.4~18
S	2.0~4.0	K	18~26.5
C	4.0~8.0	Ka	26.5~40

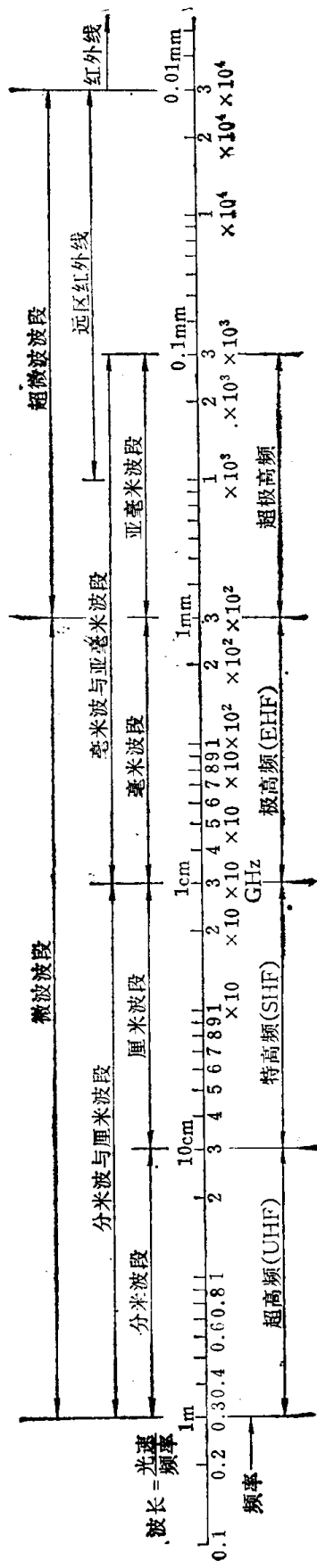


图1.1-1 微波波段

1.2 微波测量参数的分类及其有关术语

在微波理论与微波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。为此对它们进行归纳分类，以便学习掌握。

一、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“微波网络特性参数”和“微波信号特性参数”两大类。

微波网络特性参数（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，把接入单根传输线中的通过式元件或存在的不均匀性等效为双口网络，把单根传输线末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，来描述这些网络的外部特性，其电参数以网络参数表示之。从测量这些网络参数来看，多口网络可化为双口网络来测试，而双口网络的反射参数又可化为单口网络来测试。因此微波网络特性的测试，可归结为对双口网络和单口网络的表征参数的测量。

从理论分析上，特别是从测量方便性的角度上，双口微波网络最常用散射参数来表征其特性，如图 1.2-1 所示，

即

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

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

式中 a_1 、 a_2 为网络的规一化电压内向波， 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，对互易网络有 $S_{21} = S_{12}$ 。

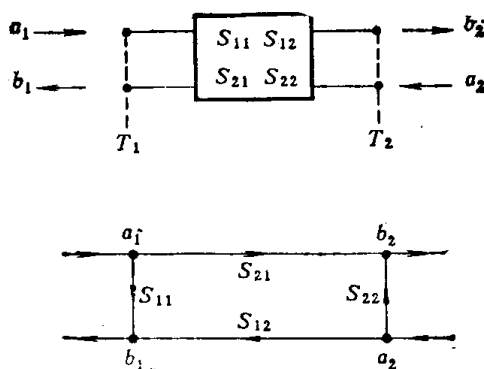


图1.2-1 双口网络散射参数及其信流图

单口网络则只需用一个反射参数 Γ 来表征,如图 1.2-2 所示,即 $\Gamma = b/a$; 有时亦采用与 Γ 有直接关系的归一化阻抗参数 $z = (1 + \Gamma)/(1 - \Gamma)$ 来表征。当在双口网络的终端接以匹配负载时,又可以像测量单口 Γ 一样地测量其反射参数 S_{11} 或 S_{22} 。

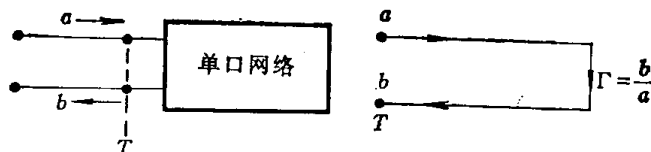


图 1.2-2 单口网络反射参数及其信流图

综合上述各量,习称为阻抗(复反射系数)与网络参数(含有源网络)。它们又进一步划分为反射参数(Γ 、 S_{11} 、 S_{22} ,有时亦称阻抗参数)和传输参数(S_{12} 、 S_{21})两个分类。这五个参数都是复量,但在微波工程中为表征元、器件的匹配程度,通常只需用反射系数 Γ 的模值或有关的标量参数作为主要技术指标;加之从测量的繁简、难易出发,亦有必要把反射参数的测量分为标量反射参数($|\Gamma|$ 、 $|S_{11}|$ 、 $|S_{22}|$ 及驻波比 $\rho = (1 + |\Gamma|)/(1 - |\Gamma|)$ 的测量)和矢量反射参数(Γ 、 S_{11} 、 S_{22} 及 z)的测量这两种不同情况。同理,也可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;同时在实际中又常需要把矢量传输系数的模值和幅角分为两个分项指标,即衰减和相移($\psi_{21} = A_{rg} S_{21}$),用来只侧重说明其中某一项指标;然而在很多情况下,仍需要全面测定其矢量传输参数,即复数 S_{21} 。因此针对测量这些复量参数时有分有合的实际情况,再考虑到教学上的便利,本书把微波网络特性参数测量分散到若干章中讲授,如表 1.2-1 所示。

表 1.2-1 网络特性测量参数分类表

网 络 特 性 测 量	标量反射参数(回波损失或驻波比)的测量 (第二、四、五章)	$ \Gamma $ 、 $ S_{11} $ 、 $ S_{22} $ 或 $\rho = (1 + \Gamma)/(1 - \Gamma)$ 、 $\rho_{11} = (1 + S_{11})/(1 - S_{11})$ 、 $\rho_{22} = (1 + S_{22})/(1 - S_{22})$ 、 $RL = -20\lg \Gamma $
	阻抗(复反射系数)与复网络参数的测量(全面测定) (第三、六、七、八章)	Γ 、 S_{11} 、 S_{22} 、 S_{21} 、 S_{12} 或 $z = (1 + \Gamma)/(1 - \Gamma)$
	传输参数的分项测定 ——衰减与相移 (第十一、十二章)	$A = -20\lg S_{21} $ 、 $\psi_{21} = A_{rg} S_{21}$

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,对标量反射参数的测量主要是用测量线法和反射计法(含反射桥)及其扫频测量。对阻抗和网络参数的全面测量主要是用测量线法、网络分析仪法(含扫频测量)、六端口技术和时域法。对衰减与相移的分项测定,除网络分析仪可以担任外,还有其它一些常用的分项测量法。

关于微波信号特性的测量,有功率、频率(波长)、波形、频谱、噪声等,本书只讲常用的前两项。

微波网络特性测量与微波信号特性测量在本课程的有限时间内以前者为重点,但并非后者不重要。

虽然为了教学上的便利,本书在内容编排上没有完全按上述概括分类法安排章次,但读者应注意到概括分类法的综合性有助于学习和归纳各种参数和测量方法之间的联系。

本书章次的安排,是考虑到功率测量误差分析和校准及波长计误差分析中要用到源驻波比的测量等知识,又考虑到衰减失配误差的分析要用到功率方程概念,所以把微波信号特性测量这部分内容放在阻抗与网络参数测量之后,衰减与相移分项测量之前。

从微波测量实验上看,把微波信号特性这一部分放在最前亦有其有利之处,根据需要也可以先讲这一部分内容;另外也还应注意本课程的前导课程有微波技术,先开和并开的还有微波网络及微波电子线路课程,有些测量课所需的基本知识,也可依靠上述这些课程来提供。故各章的讲授次序,可由教师按照具体情况,适当调整。

二、微波网络特性测量中的有关术语简介

1. 反射参数术语简介

当一个双口网络在 T_2 面端接无反射负载时〔图1.2-3(a)〕,和单口网络〔图1.2-3(b)〕一样,在输入传输线上都会由于不匹配而产生反射波,并与入射波合成为驻波,其相对电压驻波分布为

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

式中 $|\Gamma|$ 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

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

在实际测试中,由于常使用标准衰减器来测量 $|\Gamma|$ 或 ρ ,所以又常以分贝(dB)为单位表示它们。

回波损失定义为

$$RL = -20 \lg |\Gamma| \quad (1.2-5)$$

它表示反射波损失的大小。回波损失为 ∞ 时,说明网络的反射波为零,即匹配状态。

分贝驻波比定义为

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

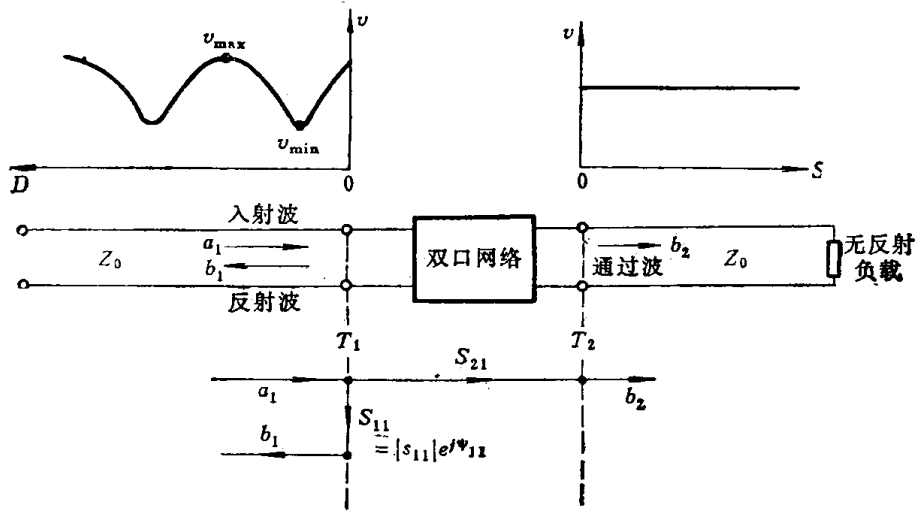
$|\Gamma|$ 、 RL 、 ρ 和 ρ_{dB} 之间关系如图1.2-3(c)所示。

2. 传输参数术语简介

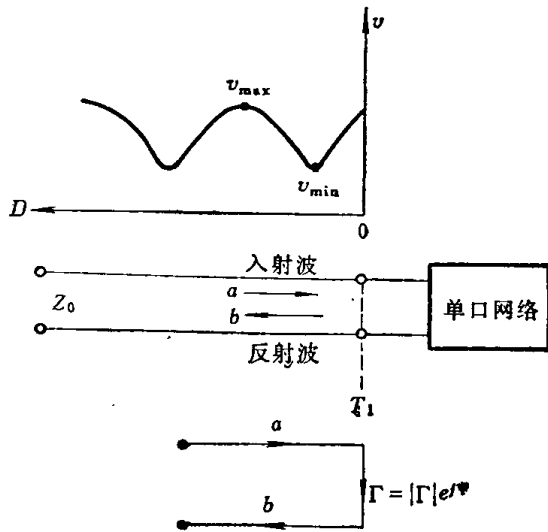
由式 (1.2-2) 和图1.2-3(a) 知, 当双口网络输出端接匹配负载时, 有

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

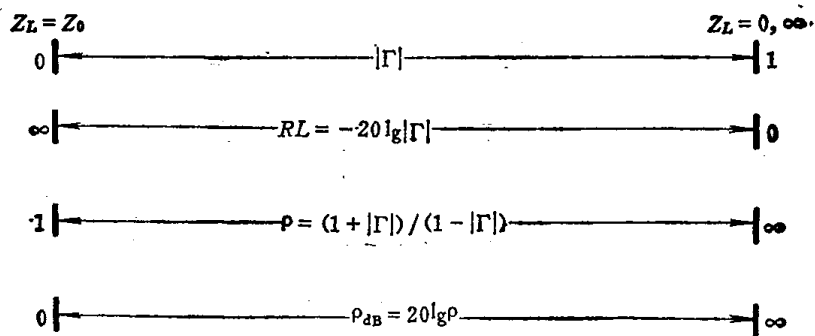
定义衰减 $A = -20\lg|S_{21}|$; 而 ψ_{21} 为传输系数幅角, 即相移。它们的单项测量习称为衰减测量和相位移测量。



(a)



(b)



(c)

图1.2-3 驻波分布及 $|\Gamma|$ 、 RL 、 ρ 、 ρ_{dB} 之间关系

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”），预示和推断出由金属容器（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。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，测量结果的数字化获得很大进展。

在阻抗与网络参数的测量方面取得重大成就，并还在迅速发展。反射计型自动网络分析仪已将其测量精确度提高到、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。较上述的网络分析仪在体积上较小，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，正是方兴未艾之时。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。前者采用误差模型修正，后者通过校准程序测定其数学模型的待定常数来计及误差。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），把待测件的时域特性直观地显示在荧光屏上，又能通过快速富利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率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位置，这是因为阻抗与网络参数的计量与功率、衰减、相移等参数的测量有着非常密切的联系，例如自动网络分析仪除能测量阻抗与网络参数外，还能测量功率计有效效率、衰减和相移等参数，也能把频域测量变换到时域测量。

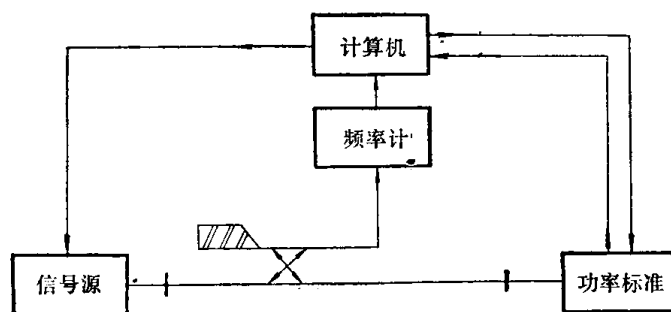


图1.3-1 由计算机控制信号源频率的方框图

微波测量发展的另一特点是测量自动化。这一特点不仅表现在上述的反射计型、六端口型和时域型网络分析仪中已经使用计算机程控并计算其测量结果上，还表现在要把计算机扩展到用于控制测量系统和常规测量上去。例如使用计算机来控制信号源频率，如图1.3-1所示，它是按编制程序由计算机去调整信号源频率，再由频率计测量之，并将

该频率的测量结果经 A/D 变换后, 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, 对于常规测量方法若与小型计算机接口也将给测试工作带来很大方便, 如测量线等, 在所用频带内, 测出反射系数的频率特性, 借助阻抗圆图可计算出待测件的时域特性^[65]。

近年来, 国内的自动化测试取得迅速进展。在1983年召开的中国电子学会电子测量与仪器学会的第二届年会上对可编程仪器通用接口线的采用和自动测试系统的通用语句、测试程序等软件进行了讨论和部署, 今后自动化测试系统的水平和智能仪器的开发将会得到更快的发展^[66]。

第二章 测量线法测量驻波比

2.1 测量线结构简介^[21, 5, 3, 1, 13]

测量线在驻波与阻抗测量中是一种最常用的、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。近来虽有新型测量方法不断出现（见第六、七章），但由于测量线的方便灵活，因此，它在测量中仍占有重要地位。特别是与六端口技术相结合，更能显示出其独到之处。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。本节介绍它们的结构，以便正确使用。

一、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。

1. 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。它是与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。

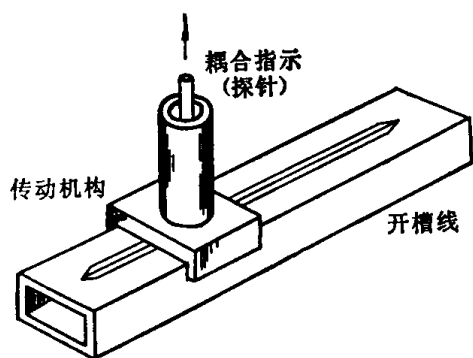


图2.1-1 波导测量线示意结构

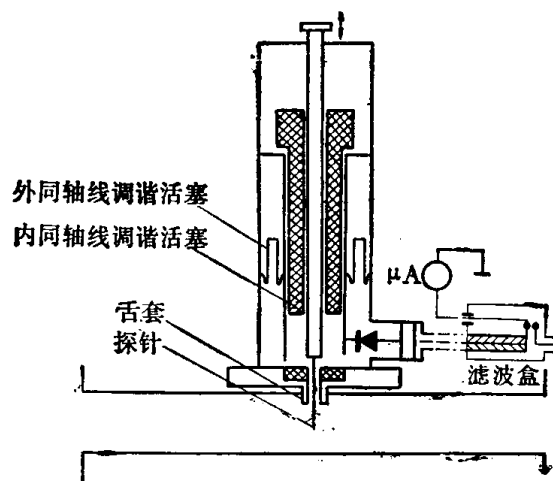


图2.1-2 探针指示机构示意图

2. 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。

探针的几何尺寸要做得足够细，以使探针对场结构的影响可以忽略不计，探针的直

径通常取 0.3~0.5mm，用磷铜丝镀银制成，伸入波导内的长度可调，一般取波导高度 b 的 5~10 %。

图 2.1-2 示出的腔体为双腔调谐机构，内同轴线的调谐活塞是由一层极薄的氧化物绝缘物质构成的，形成很大电容，从而获得可靠的高频短路。从探针向同轴线看入，内外同轴线是串联的。也有制成单调谐腔体的。设置调谐活塞的目的是为了调谐探针之用。滤波盒是为了防止外界干扰之用。

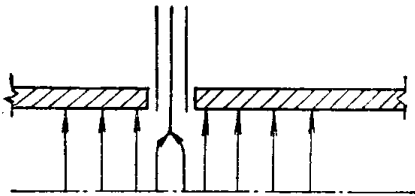


图2.1-3 探针与传输线的电耦合

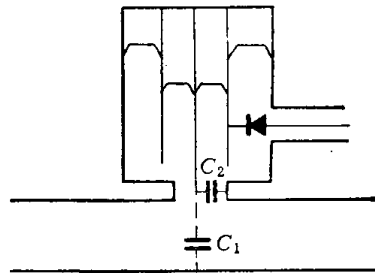


图2.1-4 探针与槽之间的分布电容为 C_2 、与底边的分布电容为 C_1

探针与槽缝之间设有舌套，它的作用是使探针移动时与槽缝之间的分布电容 C_2 保持恒定，以免测出的驻波图形失真。如图 2.1-4 所示。从图中看出 $C_2 \gg C_1$ ，所以当探针移动时，如果 C_2 不稳定将使腔体谐振条件受到破坏，而使指示数据失真。加入舌套后，探针与舌套的分布电容是恒定的，因而起到与槽缝的屏蔽作用。舌套的另一个作用是能够屏蔽由于探针与槽端的反射而产生的谐振现象。

3 传动机构

对传动机构的要求是保证探针沿槽缝中心移动时要十分平稳，且在整个槽缝内穿入深度不变，以保证耦合恒定，使驻波最小点和最大点重复出现。如厘米波段的测量线，要求探针的平稳度和平行度均在 0.01mm 左右。

二、同轴式测量线

同轴测量线是在同轴线外导体开槽做成的，如图 2.1-5 所示。它也包含三个部分，即

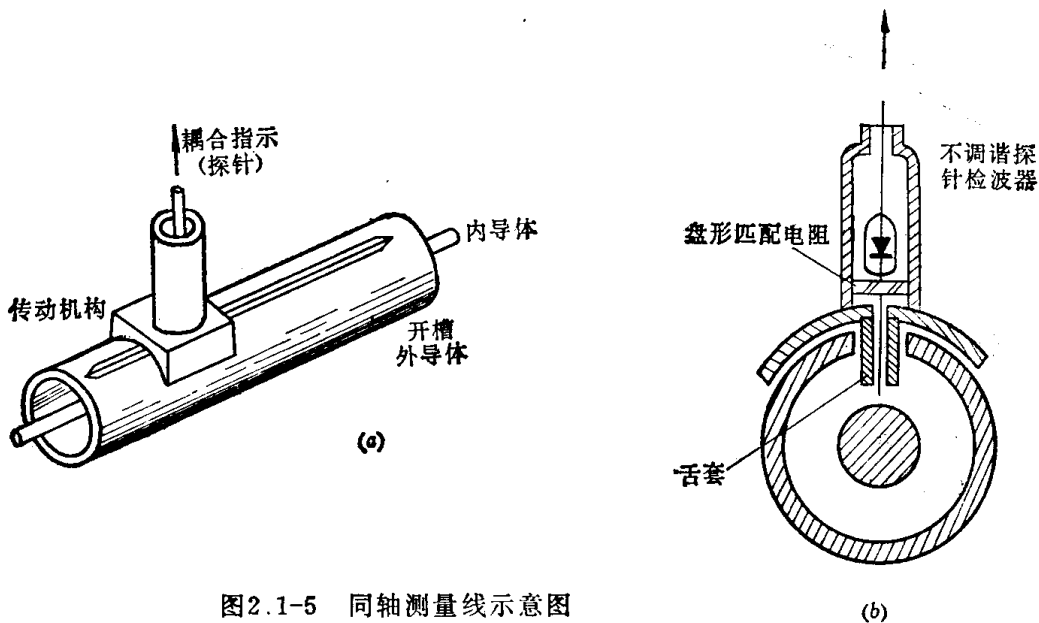


图2.1-5 同轴测量线示意图

开槽段、耦合指示器和传动机构。对它们的要求与波导测量线一样。

三、平板测量线

上述的同轴测量线在设计中的一个主要困难是要求槽缝足够窄以免影响电磁场结构的畸变和向外辐射，同时又要求足够宽以便容纳探针和舌套，还要求滑动平稳可靠。这些要求在同轴线上难以满足，为此提出平板式测量线。它在上述方面得到较满意的效果。

平板式测量线是同轴测量线的变体。根据保角变换原理，把同轴线外导体上下对称地切开，如图2.1-6(a)所示，再把它们向上下两个方向拉到无限远变成平行的平板，内导体与此相应地变成椭圆形截面，遂成为平板式同轴线[图2.1-6(b)]。这样变换后的平板同轴线与圆柱式同轴线具有相同的特性阻抗。变换前后的场结构如图2.1-6(c)、(d)所示。随着外导体的拉开，内部的电力线和磁力线也相应地被拉开，在上下两端变得很稀疏了。在这种情况下，如果探针在截面上稍有变化，其电场强度变化很微小，因此，对测量结果所受的影响也很小，相应地对加工要求有些放松。

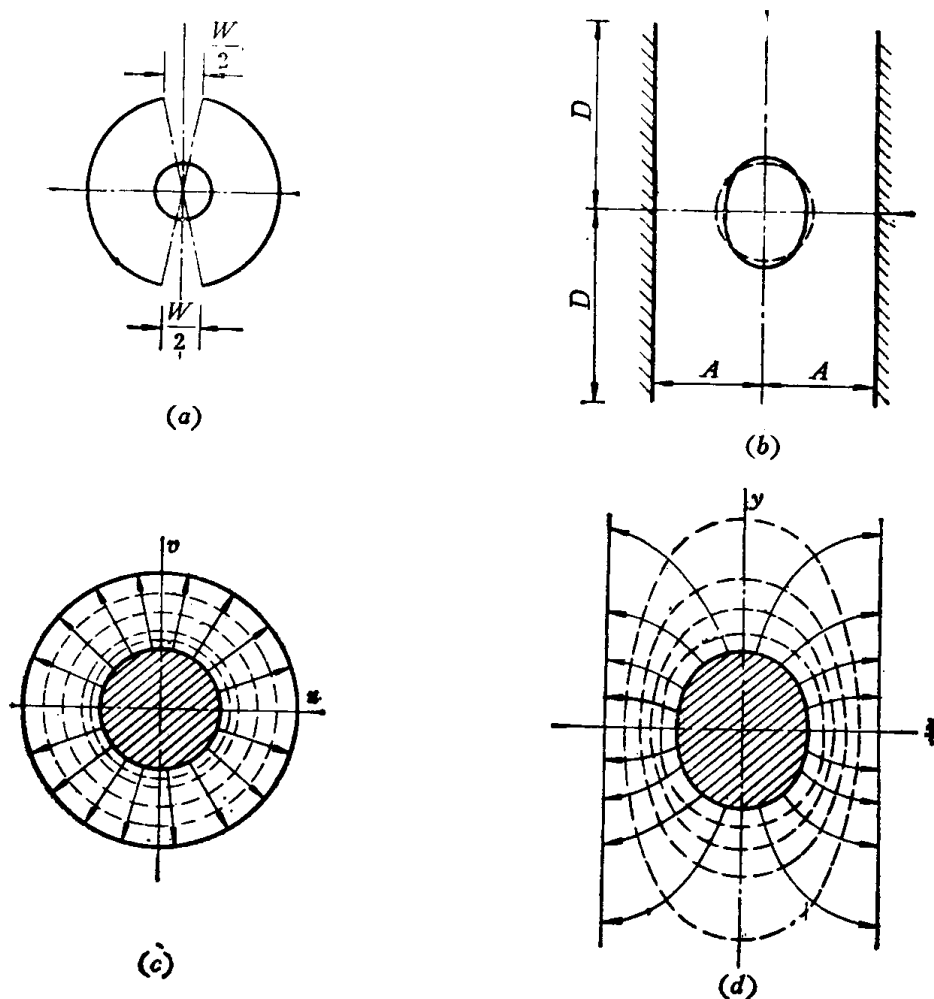


图2.1-6 平板测量线电磁场结构

——电场；----磁场。

但是，无限大平板和椭圆形截面的内导体，实现起来必然是有困难的。因此，经过适当设计就成为常见的平板测量线，如图2.1-7所示。它是两个宽度不同的平板测量