

高等学校 规划教材  
工科电子类

GH

# 近代微波测量技术

董树义 编



电子工业出版社

74.0031-169

## 内 容 提 要

本书是为适应微波测量技术的迅速发展而编写。包括三大部分内容：(1)微波扫频信号的产生；(2)微波信号特性分析；(3)微波阻抗与网络特性分析。共分十二章：第一章为引论；第二、三章为第一部分内容；第四~七章为第二部分内容；第八~十二章为第三部分内容。书末附有思考题、习题、实验参考提纲、参考书与文献。

本书可作为电磁场与微波技术、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。

## 近代微波测量技术

董树义 编

责任编辑：卢美

\*

电子工业出版社出版

北京市海淀区万寿路173信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

天竺颖华印刷厂印刷

\*

开本：787×1092毫米 1/16 印张 18.75 字数：449.9千字

1995年10月第一版 1995年10月北京第一次印刷

印数：2000册 定价：13.9元

ISBN 7-5053-2668-6/TN·787

## 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1995年,已编审、出版了三轮教材,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,在总结前三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1991~1995年的“八五”(第四轮)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

本教材系按电子工业部的工程电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由电磁场与微波技术编审委员会微波技术教材编审小组征稿、评选、推荐出版,责任编委言华。

本教材由西安电子科技大学董树义担任主编,上海大学徐得名担任主审。

本课程的参考学时为 60 学时(或 3 学分)。近代微波测量技术的内容丰富,面广意深,概括地说,它是利用近代微波仪器测量诸微波参数所采用的各种先进测试技术的总合。近代微波仪器利用了先进的微波 CAD、计算机控制和处理、微波集成技术和工艺等新成就,具有诸多新特色。仪器的发展促进了微波测量理论和技术的发展,从而形成了近代微波测量技术。近代微波测量技术反过来又促进了微波电子设备和仪器的发展。其主要特点表现为大跨度的频率范围、高精确度、高分辨力和快速测试等。本书意在介绍其基本内容。本书可划分为三个单元:(1)微波测试信号的产生;(2)微波信号特性分析;(3)微波网络特性分析。全书共分十二章。第一章为引论;第二、三章为第一单元,包括模拟式、合成式扫频信号源及其程控两部分内容;第四至第七章为第二单元,包括微波信号频率与波长、幅值(电平与功率)、频谱、噪声系数与相位噪声测量等四部分内容;第八至第十二章为第三单元,包括标量网络分析、矢量网络分析、测量线与幅值法(多端口)测量技术、时域法及介质参数测量等五部分内容。书末附有思考题与习题、实验参考提纲和参考书及文献。在实施教学时应注意:(1)将同类型基本内容归纳在同一单元,显得总体上层次分明、系统性强,便于教与学;基本测量理论与近代微波测量技术新成就相结合讲解,做到有理论、有方法、有实际;使用本教材时应注意:(1)理论与实际密切联系,为培养学生的基本技能,讲授者可按书末所列实验参考提纲,结合本校实验室情况编写“微波测量实验指导书”进行教学;(2)在内容上,应以功率、频率(与波长)和网络特性分析为重点,课堂教学最好辅以测量系统(或仪器)和典型图例的电化教学进行讲解;(3)跟踪国内外微波测量先进技术,体现专业课程的先进性。

本教材由董树义编写全稿。在书稿审定过程中,经主审人详加审阅,提出很多宝贵意见,由作者进行了修改;在收集微波仪器和测量有关资料时,得到同行们鼎力相助,在此一并感谢。但因水平有限,书中难免存在缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编者

一九九五年元月二日

# 目 录

第一章 引 论	(1)
1.1 微波测量的任务与近代微波测量技术	(1)
1.2 微波测量技术发展简介与近代微波测量主要内容分类	(3)
1.2-1 微波测量技术发展简介与其重点技术	(3)
1.2-2 近代微波测量主要内容分类	(3)

## 微波测试信号的产生

第二章 模拟式扫频信号源基本构成及其程控	(6)
2.1 引言	(6)
2.2 扫频振荡器简介	(8)
2.2-1 变容二极管电调扫频振荡器	(8)
2.2-2 返波管电调振荡器	(10)
2.2-3 YIG 电调扫频振荡器	(14)
2.3 扫频信号源程控方法	(16)
2.3-1 扫描信号发生器	(17)
2.3-2 活动频标产生器介绍	(19)
2.3-3 YIG 扫频振荡器的程控	(21)
2.3-4 仪器的自动校准能力	(23)
2.4 微波信号源稳幅原理	(23)
2.4-1 稳幅过程	(24)
2.4-2 对信号源匹配的改善	(26)

第三章 合成式扫频信号源基本构成及其程控	(28)
3.1 频率合成技术简述	(29)
3.1-1 直接式频率合成法	(29)
3.1-2 锁相环式频率合成法	(30)
3.1-3 谐波混频器扩频法	(32)
3.1-4 频率合成器主要技术指标	(35)
3.2 合成扫频信号源工作框图及其程控	(36)
3.2-1 基本框图	(36)
3.2-2 频率合成器框图	(36)
3.2-3 微波单元	(39)
3.2-4 调制和微电路控制部分	(41)
3.2-5 外围设备接口及 CPU 控制	(42)
3.2-6 合成扫频信号源系统软件	(45)

## 微波信号分析

第四章 微波信号频率与波长测量	(47)
4.1 微波频率测量	(47)
4.1-1 概述	(47)
4.1-2 微波频率测量中的扩频技术简介	(48)
4.1-3 微波数字频率计	(51)

4.1-4 频率标准介绍 .....	(56)
4.2 毫米波频率与波长测量 .....	(60)
4.2-1 毫米波频率测量简述 .....	(60)
4.2-2 闭式谐振腔波长计 .....	(60)
4.2-3 开式谐振腔波长计及干涉法波长测量 .....	(64)
第五章 微波信号幅值(电平与功率)测量 .....	(71)
5.1 功率方程式及功率计的基本构成 .....	(71)
5.1-1 微波功率测量的一般电路及功率方程式 .....	(71)
5.1-2 功率的度量单位 .....	(73)
5.1-3 功率计的基本构成与分类 .....	(74)
5.2 微波功率传感器(探头)及其指示原理 .....	(75)
5.2-1 微波晶体检波器 .....	(75)
5.2-2 测热电阻法小功率测量原理 .....	(78)
5.2-3 测量微波功率的其他常用方法简述 .....	(84)
5.2-4 微波脉冲功率测量简介 .....	(87)
5.3 微波功率座的校准及功率测量的失配误差分析 .....	(89)
5.3-1 功率座的有效效率及其校准方法 .....	(89)
5.3-2 微波功率测量的失配误差分析 .....	(92)
5.4 程控功率计简介 .....	(93)
5.4-1 第一类程控功率计(不带 $\mu P$ )工作原理 .....	(94)
5.4-2 第二类程控功率计(带 $\mu P$ )工作原理 .....	(96)
第六章 微波信号频谱分析 .....	(98)
6.1 微波频谱分析仪的构成 .....	(98)
6.1-1 引言 .....	(98)
6.1-2 扫频超外差式频谱分析仪的构成 .....	(100)
6.1-3 频谱分析仪的分辩力与动态特性 .....	(103)
6.2 微波频谱分析仪的应用 .....	(109)
6.2-1 测量信号幅值和频率 .....	(109)
6.2-2 测量调幅波调制指数 .....	(109)
6.2-3 测量调频(或调相)波的调频指数 .....	(111)
6.2-4 测量射频脉冲频谱 .....	(117)
6.2-5 测量网络的频率响应 .....	(119)
第七章 微波噪声系数与相位噪声测量 .....	(121)
7.1 噪声系数定义及Y系数方程 .....	(121)
7.1-1 噪声系数定义 .....	(121)
7.1-2 Y系数方程 .....	(124)
7.2 噪声系数测量方法 .....	(125)
7.2-1 Y系数法测量噪声系数 .....	(125)
7.2-2 噪声系数的自动测量及扫频测量 .....	(128)
7.3 频率稳定度与相位噪声测量 .....	(131)
7.3-1 频率准确度与频率稳定度 .....	(131)
7.3-2 相位噪声表示法 .....	(132)

7.3-3 相位噪声测量原理 .....	(135)
7.4 调幅噪声的测量 .....	(138)

### 微波阻抗与网络特性分析

第八章 微波标量网络分析仪原理 .....	(140)
8.1 反射计工作原理 .....	(140)
8.1-1 定向耦合器反射计工作原理 .....	(140)
8.1-2 电桥反射计介绍 .....	(150)
8.2 标量网络分析仪测量系统连接图举例 .....	(152)
8.3 标量网络分析仪扫频测量方法 .....	(154)
8.3-1 标量反射参数扫频测量方法 .....	(154)
8.3-2 标量传输参数扫频测量方法 .....	(160)
8.3-3 扫频测量的动态分析 .....	(161)
8.4 扫频信号源驻波比测量 .....	(162)
第九章 微波矢量网络分析仪的原理与应用 .....	(164)
9.1 引言 .....	(164)
9.2 微波网络分析仪测量原理 .....	(164)
9.2-1 基本测量系统与测量原理 .....	(164)
9.2-2 误差网络模型与校正值的解 .....	(167)
9.2-3 误差网络的校正方法 .....	(172)
9.3 微波自动网络分析仪(ANA)介绍 .....	(176)
9.3-1 引言 .....	(176)
9.3-2 微波自动网络分析仪介绍 .....	(176)
9.3-3 校正值的剩余误差分析 .....	(180)
9.4 晶体管 S 参数测量 .....	(184)
9.4-1 微波晶体管等效电路的表示方法 .....	(184)
9.4-2 网络分析仪法测量晶体管 S 参数的一般原理 .....	(185)
9.4-3 ANA 法测量晶体管 S 参数的校正方法 .....	(187)
9.5 MMIC 芯片测量方法简介 .....	(191)
9.5-1 晶片探针卡介绍 .....	(191)
9.5-2 MMIC 自动测试系统介绍 .....	(197)
第十章 测量线法与六端口(幅值法)测量技术 .....	(199)
10.1 微波测量线基本工作原理介绍 .....	(199)
10.1-1 微波测量线基本结构简介 .....	(199)
10.1-2 微波测量线测量系统的组成 .....	(200)
10.1-3 测量线法测量阻抗(或反射系数)原理 .....	(202)
10.2 自动测量线简介 .....	(203)
10.3 测量线与六端口法之间的联系及六端口法特点 .....	(204)
10.4 基于幅值的六端口测量装置例释及其待测参数的解 .....	(206)
10.4-1 六端口法测量阻抗原理例释 .....	(206)
10.4-2 例释六端口法的校准、测量与实验 .....	(208)
10.5 六端口法测量单端口网络一般原理 .....	(209)
10.5-1 六端口法测量复反射系数原理与设计准则 .....	(209)

10.5-2 六端口法校准原理 .....	(217)
10.5-3 六端口测量电路与系统的主要形式 .....	(222)
10.5-4 减少端口数目的幅值法测量系统 .....	(225)
10.6 六端口法测量网络参数原理 .....	(226)
10.6-1 单六端口技术测量网络参数原理 .....	(226)
10.6-2 双六端口技术测量网络参数原理 .....	(227)
10.6-3 双六端口网络分析仪校准原理 .....	(229)
<b>第十一章 时域法测量微波阻抗与网络参数原理 .....</b>	<b>(236)</b>
11.1 反射参数( $\Gamma$ 、 $S_{11}$ 、 $S_{12}$ )的时域测量 .....	(236)
11.1-1 基本原理 .....	(236)
11.1-2 显示波形与待测负载的关系 .....	(237)
11.1-3 距离分辨力 .....	(241)
11.2 传输参数( $S_{21}$ 、 $S_{12}$ )的时域测量 .....	(243)
11.2-1 基本原理 .....	(243)
11.2-2 双端口互易网络 $S$ 参数的时域测量 .....	(244)
11.2-3 波形响应与变换 .....	(245)
11.3 时域自动网络分析仪(TDANA)介绍 .....	(246)
11.3-1 网络特性的频域表示式 .....	(246)
11.3-2 时域自动网络分析仪(TDANA)方框图 .....	(248)
11.4 频域法时域反射计简介 .....	(249)
<b>第十二章 介质参数测量 .....</b>	<b>(251)</b>
12.1 引言 .....	(251)
12.1-1 介质参数定义及其影响因素 .....	(251)
12.1-2 与介质参数相关的可测量值 .....	(252)
12.1-3 介质材料样品制备 .....	(254)
12.2 传输线法测量介质参数 .....	(255)
12.2-1 介质样品的双口等效网络及 $\epsilon_r$ 的测定公式 .....	(255)
12.2-2 阻抗法测量介质参数 .....	(257)
12.2-3 网络 $S$ 参数法测量介质参数 .....	(259)
12.2-4 传输线法测量介质参数的误差源 .....	(261)
12.2-5 铁磁材料测量方法 .....	(263)
12.3 谐振腔法测量介质参数 .....	(265)
12.3-1 $H_{01n}$ 腔测量盘形介质样品 .....	(265)
12.3-2 开式谐振腔法测量介质参数简介 .....	(267)
12.3-3 微扰法测量介质参数 .....	(269)
<b>思考题与习题 .....</b>	<b>(271)</b>
<b>实验参考提纲 .....</b>	<b>(278)</b>
<b>参考书与文献 .....</b>	<b>(281)</b>



# 第一章 引 论

## 1.1 微波测量的任务与近代微波测量技术

人们要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。人们把测量比喻为科学的眼睛,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。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,保证微波量值的统一性和法制性。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。本书作为微波测量的教材,主要涉及前三项,即学习微波技术有关的基本参数的测量方法和测量系统的基本原理,以指导学生微波测量的基本理论与技能。

目前,近代微波电子工业和军用、民用微波技术迅速的发展给微波测量技术带来了冲击,并提出许多新课题。为适应这种新形势,需利用先进的微波理论与技术、工艺、电子和计算机技术研制出诸多类型的近代微波仪器,与之共融的“近代微波测量技术”随之形成。它是利用近代微波仪器测量诸微波参数,所采用的各种先进测试技术的总合。主要特点如下:

1. 大跨度的宽频带测试功能和高频率稳定度。为适应各频段电子设备的设计生产、计量检验等的测试,需要大跨度的宽带测量仪器和测量技术,这就要求测试信号具有高频率稳定度和高分辨力的性能。因此,出现了合成扫频信号源。如HP8341B合成式扫频信号源,  $f$ : 0.01~20GHz, 频率稳定度  $1 \times 10^{-9}/\text{day}$ , 分辨力: 1Hz (0.01~7.0GHz)、2Hz (7~13GHz)、3Hz (13~20GHz)。频谱分析仪 942A 的频带范围宽达 50kHz~325GHz。

2. 为提高测量精确度和速度,要求测量仪器智能化,测量系统自动化。微波电子仪器都配有程控接口,便于实现智能化和自动化测量。利用微型计算机的记忆、存储、数学运算、逻辑判断和命令识别等能力,可以组成微型计算机化仪器(Micro Computer Based Instrument),简称微机化仪器(MIB)。

微机化仪器包含一个或数个微处理器或计算机,结合软、硬件,由微机总线传递信息并完成功能电路的控制,对键盘和显示部分进行管理,显示其需要的测量结果。例如微机化数字示波器(图 1.1-1),它由控制、取样存储和读出显示三个主要部分组成,通过数据

总线、地址总线和控制总线相互联系和交换信息，具有长期存储波形、负延迟显示、便于观察单次和缓慢信号、多种显示功能等等特点。

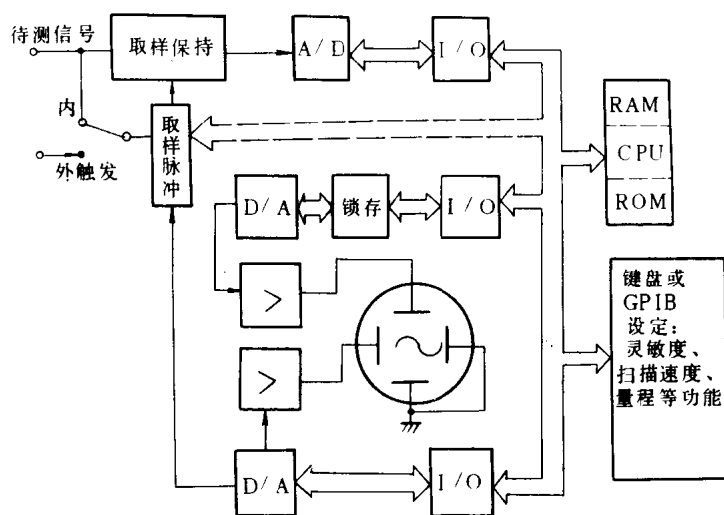


图 1.1-1 微机化数字示波器示意图

3. 一个单通道通信接收机，对本振相位噪声并没有很严格的要求，但对于多通道通信接收机，由于本振相位噪声直接出现在接收信号中，对相邻通道将产生影响。多卜勒雷达的相位噪声进入接收机频带内，将对地物干扰变得模糊。为此要求雷达系统在距离载频几百千赫范围内，相对于发射机、接收机本振载波电平的相位噪声必须小于 $-110\text{dBc}/\text{Hz}$ 。这对振荡器提出相位噪声指标的要求，于是就要研究相位噪声的测量方法和理论。

4. 微波电子设备小型化的要求激励了微波集成电路的发展。普通波导和同轴元件转移到平面电路，形成微波集成电路 (MIC)、混合微波集成电路 (MHIC)，进一步发展到单片微波集成电路 (MMIC)。原来适用的微波晶体管  $S$  参数测量方法，须进一步发展到适用 MMIC 芯片的内电路诊断和外端测试的要求。这就对微型电路和微波阻抗与网络参数测量提出了新的课题，促使微波测量技术向微型测试、电-光测量技术的方向发展。

5. 新型微波电子设备的研究，促进了微波材料的发展。对微波材料介质参数的测量，除改进原有的方法之外，还要研究新的测试方法。例如多层介质参数测量，毫米波材料特性的测量等等。在波段上向毫米波准光技术发展。

6. 目前微波电路设计普遍使用 CAD 方法。正确的微波 CAD 来自于准确、可靠的微波测量 CAT。例如设计微波晶体管电路，没有准确、可靠的晶体管  $S$  参数的测量方法，即使是良好的 CAD 方法，也难以实现其正确的设计。

7. 利用软件提高测量精确度。例如采用精密测量技术的各种拟合模型可提高测量精确度，误差网络法或计入误差法能在很大程度上消除系统误差，提高测量准确度等。

还可举出很多新的发展，不一而足。仅从上述部分情况看出，近代微波电子工程和微波应用的发展已经促成近代微波测量技术这一学科前沿课题。编写此书目的，旨在使学生能跟上发展形势。

## 1.2 微波测量技术发展简介与近代微波测量主要内容分类

### 1.2-1 微波测量技术发展简介与其重点技术

19 世纪末期建立了麦克斯韦方程组和电磁场理论。1864 年麦克斯韦发表《电磁场动力学理论》，1897 年 J·W·瑞利建立金属波导管传播电磁波理论，并推断出由金属容器（空腔谐振器和有源器件相结合）激发空金属管，有可能传输电磁波能量。大约在 1933 年，科学家在实验室发现了空金属管能够传输电磁波。1936 年，索思沃思和 W·巴罗发表了波导传输模式的激发和测量论文。这是微波学科的诞生时期。可见微波学科同其他学科一样，从诞生起就有在理论指导下，伴随实验研究的特点。二次大战期间，由于军事需要，微波实践的发展超前于理论发展。直到战后，微波理论、技术（含测量方法）经过总结，都提高到一个新的水平。在微波测量方面，五、六十年代所提供的信号源，以速调管等点频信号源为主。微波工程需要测试的参数很多，那时以三大测量为重点，即阻抗、频率（波长）和功率测量。阻抗测量以测量线为主要仪器，频率测量以外差频率计和波长计为主，功率测量方面，中小功率以热敏电阻为主，大功率以水负载或以定向耦合器小功率扩展法为主。且频带不宽。

自七、八十年代至今，计算机技术和固态半导体技术的迅速发展，将微波测量技术推向一个新的阶段，形成近代微波测量技术。在信号源方面，以模拟式和合成式扫频信号源为特征，扫频范围极宽，在微机控制下增加了智能和自动测量功能。在微波参数测量方面，阻抗与网络参数测量以自动网络分析仪（ANA）为重点，频率与功率测量仍属于信号特性分析的主要内容。近代微波测量技术要求测量的微波参数远不只这三种，但这三大测量仍是近代微波测量技术的基础。就是说，为了给测试系统提供测试信号，至少需要了解其输出功率和频率的数值，对于一个微波待测件，至少需要知道它的反射特性和传输特性。反射特性和传输特性的总合即阻抗与网络特性分析。所以近代微波测量技术的重点内容乃是以传统微波测量技术的重点内容为基础，赋以近代的测量方法形成的。ANA 法就是一个典型实例。

从无线电频谱的发展看，近代微波测量技术与仪器是电子测量技术与仪器向无线电频谱高端发展的结果。它是在微波领域认识客观世界和取得定性和定量信息的基本方法，是微波电子系统和设备研究、开发、生产与维护修理运转中不可缺少的检测手段和工具。随着微波学科的高速发展，微波测试技术将处于现代电子设备的设计与研制的关键地位，并成为生产、研制能力和实用性水平的重要标志。据分析，对于电子工程，其测试技术与仪器的成本约占 50~70%。可见未来的高技术中，微波毫米波测试技术与仪器及其自动化测试系统（ATE），将成为研制、生产与维修中的重要组成部分。

### 1.2-2 近代微波测量主要内容分类

由上可知，近代微波测量技术的内容很多，概括起来可分为：微波扫频信号的产生与控制，微波信号特性和微波网络特性测量技术等三类。前者提供微波测试信号，后两者提供测试微波信号特性和阻抗与网络特性的方法。如图 1.2-1 所示，其中带“\*”者为三大测

量的基本内容。

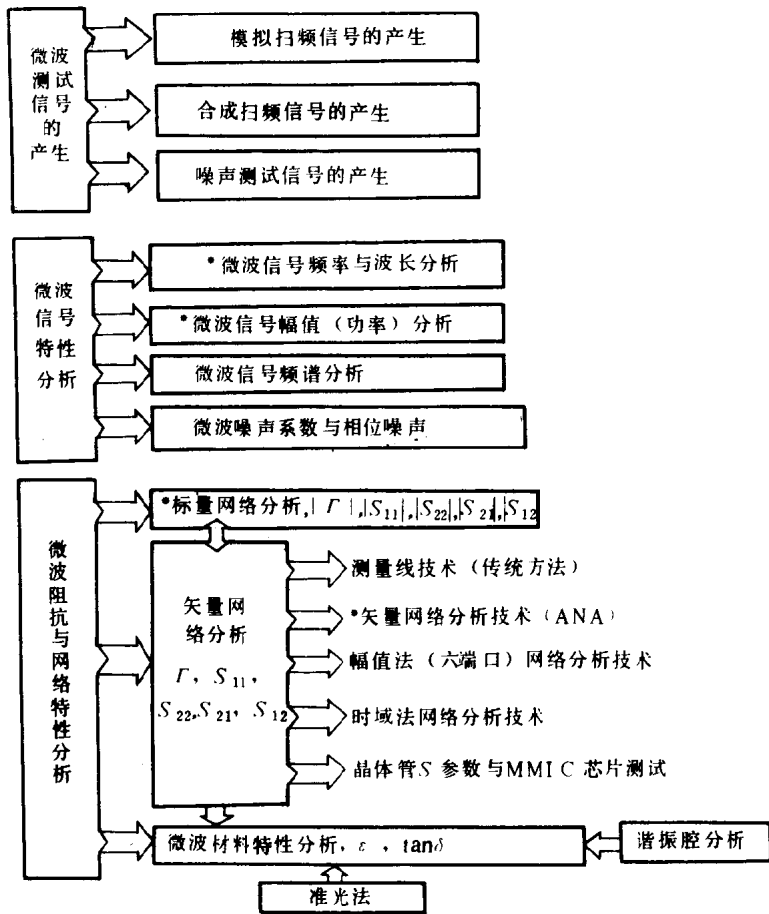


图 1.2-1 近代微波测量技术主要内容分类

本书将以上述三类内容为基础，选择各类中典型技术，予以阐述。

# 微波测试信号的产生

近代微波测量技术，要求准确、快速、智能和自动，以提高测量的工作效率。在组成测量系统时，首要的是要有具备上述功能的信号源，提供测量信号，才能组成符合要求的自动测量系统。

微波测量的测试对象是微波元器件或整机的高频段。它们都工作在一定频率范围内的宽带或窄带中。故常用扫频测量系统。扫频测量系统与点频测量系统，在组成原则上是相同的，所不同的是扫频测量系统要求信号源输出频率能以直接方式进行线性扫动，而测量装置要有足够的带宽。

扫频信号源按输出频率是否经过锁定，分为模拟式扫频信号源和合成式扫频信号源。后者采用频率合成技术，使输出频率在若干点频率上得以锁定，能获得高准确度的输出频率。

扫频信号源属于正弦信号源。它在线性系统测量中占有重要位置。正弦测试信号不受线性元、器件或系统的影响。即受正弦信号激励的线性电路中的电压或电磁场、电磁波都是具有同一频率的正弦波，只是幅值和相位有所变化。这说明正弦波测试是线性系统频域测试的重要实验手段。所以，扫频信号源是频域分析中必不可少的一种仪器。

本单元主要讲述获得模拟式与合成式扫频信号的基本工作原理及其程控的基本过程。以便了解在近代测量系统中提供扫频测试信号的基本方法。

## 第二章 模拟式扫频信号源基本构成及其程控

### 2.1 引言

扫频测量系统一般包括三个部分：扫频信号源、测量装置和检测指示设备。它们在计算机控制管理和处理数据的情况下进行自动测试工作。如图 2.1-1 所示。其中扫频信号源是提供测试信号的必备仪器。信号源分为点频和扫频两种工作方式。点频源是指手动改变振

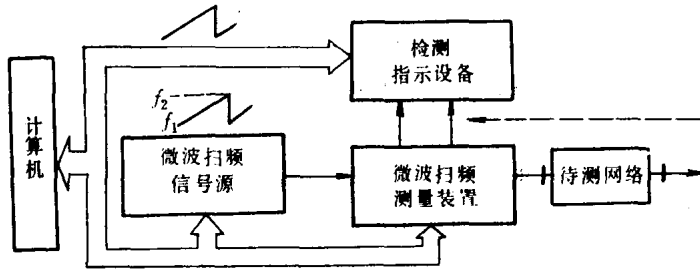


图 2.1-1 扫频测量系统框图

荡频率，输出单一频率的信号源。测量频带响应时，需逐点改变频率，费时，但精确度较高。利用扫频源显然可以提高测量速度。扫频源分连续扫频和逐点扫频两种工作方式。一般情况，连续扫频的精确度低些，适用于一般精确度的测量。逐点扫频的频率间隔足够小时，在阴极射线示波管或记录仪上，可显示间隔足够小的离散曲线，一般是肉眼无法区分的“连续”曲线。它能保持点频测量的高精确度，并在计算机控制下，提高工作效率。

一般微波信号源按有无功率定标装置分简易和标准信号源两种。其基本框图如图 2.1-2 所示。简易微波信号源不设置参考电平指示器和定标衰减器。此外，还有稳频、稳幅信号源。

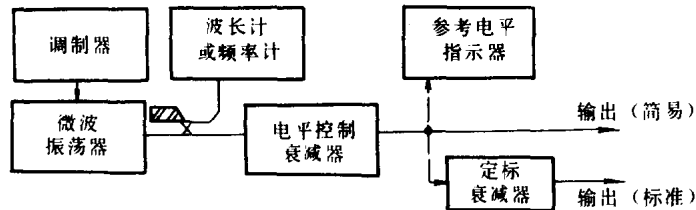


图 2.1-2 一般微波信号源基本框图

微波扫频信号源的基本组成如图 2.1-3 所示，图中的微波扫频振荡器，一般使用 VCO。其中的混频器是为扩展频率而接入的，扫频振荡器输出的信号与本地振荡器信号在混频器

作用下，产生基波、谐波的差频与和频信号，根据需要由滤波器选取。再经宽带放大器放大之后，由输出衰减器控制输出功率大小

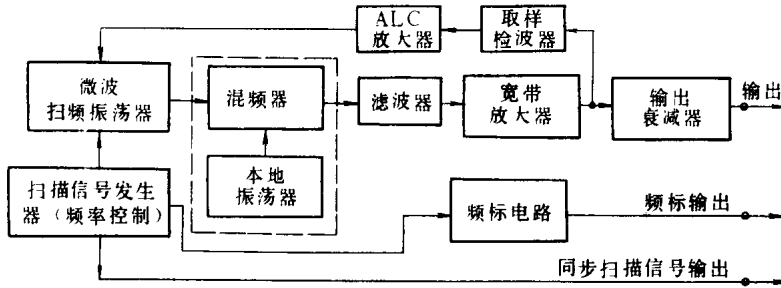


图 2.1-3 模拟扫频信号发生器基本框图

在扫频带宽之内，振荡器输出功率不恒定，加之放大器可能产生寄生调幅，故需加入稳幅环路（ALC）以使输出恒定。

扫描信号发生器产生扫描电压，一路控制 VCO 产生调频，一路输出到显示器作为同步信号之用，一路经过频标电路产生所需要的频标信号，供显示频标之用。频标产生电路的形式，视具体信号源而定。

### 一、扫频信号源的基本功能

(1) 输出扫频信号，通常是等幅的正弦波或受方波调制的键控扫频波；(2) 输出与扫频调制频率同步的扫描信号，加到指示设备上，以获得稳定的频响曲线。扫描信号可以是三角波、正弦波、锯齿波或提供逐点扫频的阶梯斜波等波形；(3) 输出与扫频同步的频率标志和电平标志，有等间隔的通用频标、专用频标、电子频率刻线、活动频标，以及电子电平刻线等。

### 二、对扫频信号源的基本要求

(1) 在欲定扫频范围内，要求有良好的调频线性度和恒定的、足够大的功率输出，以减小非线性失真和得到较大的测量动态范围；(2) 为减小测量误差，要求扫频输出有足够小的寄生调幅和谐波失真；(3) 扫频范围可调，以适应测量宽带和窄带元器件的频宽要求；(4) 有可变的扫描速度、频标、稳幅和调制等，以便能进行有效的校准和测量。

### 三、扫频信号源的主要工作特性

1. 有效扫频相对带宽：它是指在满足扫频线性度和振幅平稳度要求下的最大频率覆盖范围与中心频率之比。通常用相对值表示，

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_2 - f_1}{(f_2 + f_1)/2} = 2 \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \quad (2.1-1)$$

式中： $\Delta f$ ：有效扫频范围，等于可覆盖的最高频率与最低频率之差；

$f_0$ ：有效扫频范围的中心频率。

2. 扫频线性度：它表示扫频振荡器或其信号源压控特性曲线的非线性程度，如图 2.1-4 所示。 $\Delta f_{\max}$  为偏离线性最大误差，在扫频范围内应尽可能小。通常用微分特性表示，称为扫频线性系数，有两种表达方法，即

$$\epsilon_1 = \frac{(df/dv)_{\max}}{(df/dv)_{\min}} \quad (2.1-2)$$

式中  $df/dv$  是压控振荡器（VCO）的控制灵敏度，也称为微分增益。由于非线性扫频误差

在各点可能不同，也常表达为

$$\epsilon_2 = \frac{(df/dv)_{v_1} - (df/dv)_{v_2}}{(df/dv)_{v_0}} \quad (2.1-3)$$

$\epsilon_2$  用微分差值的大小直接反映了非线性误差的大小。 $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  应分别接近 1 和 0，这是比较理想的情况。

3. 输出功率平稳度：扫频信号源平稳的输出功率，是靠自动电平控制 (ALC)，即由稳幅环路获得的。其平稳度用下式表达

$$M_1 = 10 \lg \frac{W_{\max}}{W_{\min}} \text{dB} \quad (2.1-4)$$

式中  $W_{\max}$  和  $W_{\min}$  为稳幅输出功率起伏的最大值和最小值。也可以表示为

$$M_2 = \frac{W_{\max} - W_{\min}}{W_{\max} + W_{\min}} \times 100\% \quad (2.1-5)$$

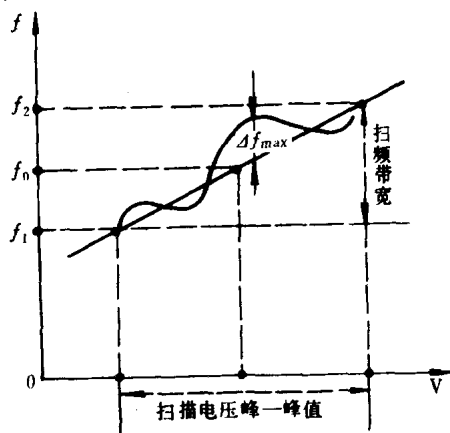


图 2.1-4 电调非线性表示法

4. 谐波分量和剩余调频：扫频信号源工作于单频  $f_0$  等幅输出时，设输出功率为  $P_0$ ，谐波  $Nf_0$  和非谐波  $Mf_0$  的功率分别为  $P_N$  和  $P_M$ ，则

$$\text{输出谐波分量} = 10 \lg \frac{P_N}{P_0} \text{dB} \quad (2.1-6)$$

$$\text{输出非谐波分量} = 10 \lg \frac{P_M}{P_0} \text{dB} \quad (2.1-7)$$

当单频  $f_0$  工作于等幅输出时，测出剩余调频频偏为  $\Delta f$ ， $\Delta f$  愈小愈好。

此外，还有扫描时间、扫频时间、频率标志等工作特性，在此不再一一描述。

## 2.2 扫频振荡器简介

常用的微波扫频振荡器有：变容二极管电调振荡器，YIG（钇铁石榴石铁氧体）电调振荡器、返波管电调振荡器、反射速调管振荡器等。第四种调频范围较小。这些电调振荡器都是利用它们自身的电压与振荡频率之间的函数关系来实现电调频的，也称为压控振荡器 (VCO)。下面简介目前使用较多的前三种电调振荡器的基本原理。

### 2.2-1 变容二极管电调扫频振荡器

当变容二极管加上反向偏压  $V$  时，PN 结电容  $C_D$  与电压  $V$  的关系，可用下式表示

$$C_D = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{V}{V_D}\right)^n} \quad (2.2-1)$$

式中  $C_0$  是零偏置时的电容量， $V_D$  是接触电位差；硅管的  $V_D$  约为 0.7V，锗管的  $V_D$  约为 0.2~0.3V； $n$  是 PN 结的系数，称为电容变化指数，它取决于 PN 结的结构和杂质分布情况。

变容二极管根据 PN 结杂质分布情况和电容特性，一般分为三种：(1) 扩散型二极管的杂质分布是缓慢的，称为“缓变结”，其  $n=1/3$ ；(2) 合金型二极管的杂质分布和空间电荷



分布是突变的，称为“突变结”，其  $n=1/2$ ；(3) 另一种是由特殊工艺制成的称为“超突变结”的变容二极管，其  $n$  在  $1\sim 5$  之间可以作成不同的  $n$  值。这三种变容管的电容量  $C_D$  与反向偏压  $V$  的变化关系，如图 2.2-1 (a) 所示。

将变容二极管接入振荡器的振荡回路，再将周期扫描电压加到变容二极管上，则振荡频率就随扫描电压作周期性调频变化。但从式 (2.2-1) 看出， $C_D$  与反偏  $V$  是非线性关系， $C_D$  与频率  $f$  的关系是：

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_D}} \quad (2.2-2)$$

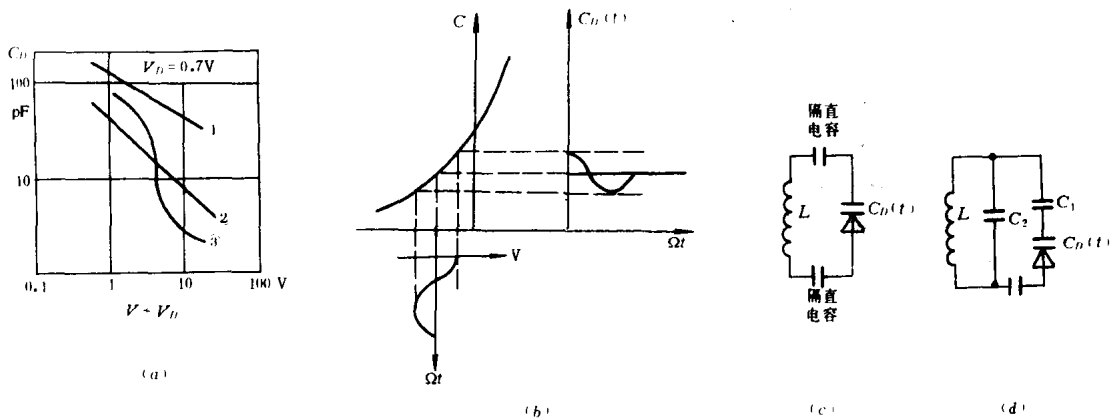


图 2.2-1 变容二极管调频特性分析

(a) 变容管 C-V 特性 ①缓变结 ②突变结 ③超突变结；  
 (b) 电调原理；(c) 变容管全部接入振荡回路；(d) 部分接入回路

所以， $f-V$  是非线性关系。为得到线性调频，必须在电路设计上采取适当措施。例如图 2.2-1 (b)，当反偏扫描电压  $V = V_D + V_a \cos \Omega t$  时，( $V_D$ ：直流偏压， $V_a$  为扫描信号振幅， $\Omega$  为扫描信号频率)，由式 (2.2-1) 得出  $C_D-V$  表示式为

$$\begin{aligned} C_D(t) &= \frac{C_0}{[1 + (V_0 + V_a \cos \Omega t) / V_D]^n} = \frac{C_0}{[(1 + V_0 / V_D) (1 + m \cos \Omega t)]^n} \\ &= \frac{C_{D0}}{[1 + m \cos \Omega t]^n} \end{aligned} \quad (2.2-3)$$

式中： $m = V_a / (V_0 + V_D)$ ：电容调制系数。

$C_{D0} = C_0 / (1 + V_0 / V_D)^n$ ：偏置  $V_0$  时的结电容。

若将  $C_D(t)$  直接接入振荡回路 (图 2.2-1 (c))，则振荡回路频率为

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_D(t)}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_{D0}}} (1 + m \cos \Omega t)^{n/2} \\ &= f_0 (1 + m \cos \Omega t)^{n/2} \end{aligned} \quad (2.2-4)$$

由上式看出，只有  $n=2$  时， $f = f_0 (1 + m \cos \Omega t)$ ，才能得到较理想的线性调频。如果  $n \neq 2$ ，