

计量测试技术手册

第8卷 电子学

《计量测试技术手册》编辑委员会



中国计量出版社

计量测试技术手册

第8卷 电子学

《计量测试技术手册》编辑委员会

中国计量出版社

(京)新登字 024 号

内 容 提 要

《计量测试技术手册》包括计量测试技术基础、几何量和温度、力学、电磁学、电子学、声学、光学、时间频率、电离辐射、化学等量的计量测试技术,全套共 13 卷。

本书为第 8 卷“电子学”。内容包括:概论,电压,功率,噪声,衰减,相移,微波阻抗,集总参数射频阻抗,微波复介电常数,网络参数,场强和干扰,脉冲参数,失真度,调制度,半导体材料电参数和信号发生器参数等,共 16 章。

本书供从事计量测试工作的科技人员、管理人员查阅使用,也可供其他有关人员参考。

Abstract

This handbook consists of the basic principle of measurement and measurement technology for geometrical quantities, temperature, mechanical quantities, electronics, electromagnetic quantities, acoustics, optics, time and frequency, ionizing radiation and chemistry etc. The whole set contains 13 volumes.

This book is volume 8, "Electronics" which includes Introduction, Voltage, Power, Noise, Attenuation, Phase shift, Microwave impedance, Lumped parameter RF impedance, Microwave complex permittivity, Network parameters, Field strength and interference, Pulse parameters, distortion depth, Modulation depth, Semiconductor material electrical parameters and Signal generator parameters.

It is a valuable reference book for the metrologists, management staffs and other persons associated.

图书在版编目(CIP)数据

计量测试技术手册 第 8 卷:电子学/《计量测试技术手册》编辑委员会编著. —北京:中国计量出版社,1997. 2

ISBN 7-5026-0753-6/TB·468

I. 计… II. 计… III. ①计量-测试技术-手册②电子学-计量-测试技术 IV. ①TB9-62②TB97

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 10418 号

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787×1092 毫米 16 开本 印张 48.5 字数 1646 千字

1997 年 2 月第 1 版 1997 年 2 月第 1 次印刷

*

印数 1—2000 定价:105.00 元

序

当人类文明的曙光照耀着历史长河的源头时,伴随着生产和社会活动的需求,计量就萌发了。我国古时秦始皇施行了度量衡制度,被看作是一项重要政绩,标志着社会的进步。本世纪欧洲各国也制定了计量单位,如英国的英尺、磅等。直至1898年,国际米制公约公布,号召各国采用统一的米制公斤计量标准,可说是顺应社会发展,时代进步的必然产物。随着科学技术和贸易的发展,大概始于本世纪与上世纪之交,计量又从传统的度量衡扩展到众多的新兴领域。各种计量要求的精确程度及实施的复杂性与日俱增,计量已成为一门独立的学科。特别是在今天高新技术迅速发展的时代,计量更是无所不在和不可缺少的科学手段。今天计量测试技术广泛应用于工农业生产、国防建设、科学研究、国内外贸易、医疗卫生,以及人民生活的各个领域。在现代社会中,人们把人、管理、原材料、工艺装备、计量测试技术列为工业生产的五大支柱。计量测试技术也是整个科学技术和国民经济的一项重要技术基础。

在原国家计量局和现国家技术监督局的支持下,由中国计量出版社组织编写的《计量测试技术手册》即将出版。这套手册由100多位长期从事计量测试工作的专家、教授,历经7年编纂而成。该套手册总结了我国40多年来计量科学研究和实践的经验,吸取了国外先进技术,内容丰富,实用性强。并保持了从事计量工作一向遵循的科学上的严谨性,是适用于各个领域科技人员的工具书。

可以指出,编写的手册是一项组织繁杂,集体辛勤劳动的果实,是对我国计量事业做出了一个卓有贡献。为此,谨向所有付出心血的编者表示敬意。



1995年10月18日

《计量测试技术手册》编辑委员会

主任委员：陈宽基

副主任委员：倪伟清 徐孝恩 李绍贵 房景富 王东宝

委员：(按姓氏笔画顺序排列)

于 渤	王朋植	王晓莹	史元明	孙维民
师克宽	刘宝兰	刘瑞清	陈小林	陈艳春
何 贡	何伟仁	林宗虎	林鸿初	金士杰
施昌彦	席德熊	徐 鹤	黄秉英	窦绪昕
谢 英	潘君骅	潘秀荣		

本卷编辑委员会

主 编：席德熊

委 员：席德熊 冯新善 胡希平 陈成仁 宋孟宗
蔡新泉 刘宝兰

撰 稿 人：席德熊 周信豪 冯新善 蔡新泉 宋孟宗
徐燕清 胡希平 张关汉 赵桂芬 陈成仁
都世民 郭允晟 翁昌瑜 张汉祥 叶道生
马正良 李淑麟 杨玉球 姜云祥

本卷责任编辑：王朋植

本卷责任编辑：刘宝兰

版 式 设 计：孙丽英 凌赛利

插 图 设 计：孙丽英

前 言

我国的现代计量测试工作,始于本世纪 50 年代初,经过 40 多年的积累和发展,已建成具有门类较为齐全,覆盖全国的计量测试技术网络,在生产、科研和经贸中发挥着生产力的作用。计量测试队伍也从计量行业扩展到各技术领域的计量、测试人员,形成宏大的专业大军。作为这一专业领域的知识积累——编写《计量测试技术手册》,既是广大计量测试人员的要求,也为推进计量测试技术转化为生产力所需要。

《手册》旨在成为计量测试人员和技术科研、设计人员案头技术咨询的必备工具书,力求以技术科学性、数据准确性、资料实用性、查阅方便性来组织书稿内容。全书按计量测试技术各专业立卷,共 13 卷,覆盖了这一技术领域的全貌。各卷按各自专业特点,要求做到既独立完整,又相互协调统一。

《手册》是在原国家计量局和现国家技术监督局的支持和帮助下,由中国计量出版社组织编写的,并成立了各卷的编审委员会,得到了中国计量科学研究院和一些科研单位、大专院校的大力支持,有上百名计量测试技术专家、学者参与了编写工作,历经 7 个多寒暑,为此付出了艰辛的劳动。值此《手册》面世之际,我们谨向支持和参与《手册》编写、编辑出版的所有人员致以敬意!

编写如此浩大又涉及众多学科的《手册》,是一项系统而又细致的工程实践,要做到全面、完整、准确、统一是十分困难的,虽经共同努力,层层把关,也难免存在术语上的不统一,内容上有一定交叉重复,符号不太一致等问题。还会有错漏和不足,诚请广大读者批评指正,以便在《手册》再版和修订中改正。

《计量测试技术手册》编辑委员会

1995 年 9 月

编 者 的 话

电子计量测试是以无线电电子学中经常遇到的电磁量和非电量为对象的计量测试。这些习惯称为参量的量中比较重要和基本的就有近 20 个,此外尚有很多与专用电子测量设备相应的参量。这些参量不是一成不变的,通常随着电子技术的发展有所增减或转移。

电子计量测试所覆盖的频率范围大体上常指在 30kHz 以上一直到约 110GHz,即从低射频直到微波中的亚毫米波波段。不同参量适用的频率范围不同,有些参量只适用于射频段,有些参量则主要用在微波波段、毫米波波段甚至亚毫米波波段。

比较全面论述电子计量测试的著作已有许多。《无线电计量测试丛书》已出版的有十三个分册,除《概论》外,其余各册分别阐述各主要参量计量测试所依据的原理、测量技术、仪器和标准器或标准装置。《现代计量学概论》则只有一篇涉及电子计量。

本书内容有别于上述著作。为方便读者查阅有关知识,本书力求做到手册化和系统化,表述简明扼要,取材尽可能全面,希望成为受读者欢迎的工具书。

按编写计划,本书还应包括半导体分立器件、半导体集成电路参数、数据域仪器参数和电视电声仪器参数等内容,由于时间紧迫只能忍痛割爱。

组织众多作者合作编写一本手册是一件很繁复的工作。我们虽然尽了很大努力,但限于水平和经验,疏漏和错误在所难免,望读者指正赐教。

主编 席德熊

目 录

第1章 概 论

1 电子计量测试的基础知识	(1)
1.1 电磁波频谱的划分	(1)
1.2 集总参数与分布参数	(3)
1.3 传输线	(3)
1.4 电子计量测试中常用的测量技术	(5)
1.5 电子计量测试对环境的特殊要求	(7)
2 电子计量测试的内容和特点	(8)
2.1 电子计量测试的内容	(8)
2.2 电子计量测试的特点	(11)
3 电子计量测试的国际组织和国际 比对	(13)
3.1 电子计量测试的国际组织	(13)
3.2 电子计量测试的国际比对	(14)

第2章 电 压

1 电压测量的基本概念	(26)
1.1 电压测量的特点和应用	(26)
1.2 电压测量中的一些名词	(33)
1.3 电压测量仪器的分类	(35)
2 电压的测量误差	(36)
2.1 电压表的误差	(37)
2.2 波形失真引起的误差	(39)
2.3 连接导线引起的测量误差	(43)
2.4 同轴线连接时的测量误差	(43)
2.5 负载效应引起的测量误差	(44)
2.6 地电流和泄漏引起的测量误差	(45)
2.7 电压测量误差一览表	(45)
3 电子电压表	(47)
3.1 模拟式电压表	(47)
3.2 数字式电压测量仪表	(54)
4 电压标准	(58)
4.1 电压源式电压标准	(58)
4.2 二极管补偿式标准电压表	(60)
4.3 利用热电元件的电压标准	(62)

4.4 测热电阻式电压标准	(68)
5 电压标准的量程扩展	(73)
5.1 低阻衰减法	(73)
5.2 前置衰减法	(73)
5.3 用衰减测量装置扩展量程	(73)
6 电压表检定方法	(74)
6.1 概述	(74)
6.2 电子电压表的基本误差检定	(76)
6.3 电压表的频率附加误差检定	(76)
6.4 选频电压表的检定	(76)
7 电压测量仪表检定规程索引	(77)

第3章 高频和微波功率

1 功率测量的基本概念	(79)
1.1 高频和微波功率测量的特点	(79)
1.2 功率测量中有关的名词	(79)
1.3 功率的单位	(80)
2 高频和微波功率的测量方法	(81)
2.1 功率测量方法的分类	(81)
2.2 低电平功率测量	(81)
2.3 高电平功率测量	(89)
2.4 脉冲峰值功率测量	(91)
3 微波功率标准	(96)
3.1 量热式功率标准	(96)
3.2 微量热式功率标准	(97)
3.3 各国功率标准概况	(98)
4 微波功率计的校准和检定	(101)
4.1 交替比较法	(101)
4.2 单定向耦合器比较法	(102)
4.3 反射计法	(103)
4.4 功率方程法	(105)
4.5 功率座自动校准系统	(106)
4.6 用网络分析仪校准微波功率座	(107)
4.7 用六端口技术校准功率座	(108)
5 微波功率量值传递	(108)
5.1 射频与微波功率计量器具检定系统	(108)

5.2 微波功率量值传递方式的改革	(110)
5.3 微波功率计量检定规程	(117)

第4章 高频和微波噪声的计量测试

1 噪声	(118)
1.1 噪声的来源与类型	(118)
1.2 噪声量值	(119)
1.3 尼奎斯特定理的普遍证明	(121)
2 线性网络噪声特性的表征	(122)
2.1 单端口网络噪声特性的表征	(122)
2.2 二端口网络噪声特性的表征	(124)
3 噪声测量	(133)
3.1 噪声测量方法	(133)
3.2 低噪声放大器测量实例	(139)
3.3 噪声测量的常用仪器	(143)
4 噪声计量	(147)
4.1 噪声发生器的校准	(147)
4.2 自动噪声系数测试仪的校准	(153)

第5章 衰 减

1 衰减计量测试中的一些基本知识 ..	(157)
1.1 衰减计量测试的对象和内容	(157)
1.2 表征高频和微波器件特性的各种网络参量	(157)
1.3 各种网络参量和S参量的换算关系式	(158)
1.4 衰减及其有关术语的定义	(158)
1.5 衰减及其有关术语之间的关系	(159)
1.6 失配误差的计算公式、性质和减小方法	(160)
1.7 衰减计量测试与功率、电压、噪声等基本参量的关系	(161)
1.8 衰减的单位及其相互换算	(161)
2 衰减计量测试仪器	(162)
2.1 衰减计量测试仪器的分类	(162)
2.2 衰减器按准确度分级的国际标准文件	(163)
2.3 电阻式衰减器	(163)
2.4 截止式衰减器	(168)
2.5 回转式衰减器	(170)
2.6 波导吸收式可变衰减器	(173)
2.7 耦合式开关衰减器	(173)
2.8 感应式标准衰减器	(174)
3 衰减计量测试方法	(175)

3.1 各种衰减计量测试方法评述	(175)
3.2 高频替代法(直接比较法)	(176)
3.3 中频替代法与低中频替代法	(177)
3.4 调制副载波法	(186)
3.5 低频替代法	(188)
3.6 功率比法	(189)
3.7 时间间隔比法	(189)
3.8 信号幅度倍增法	(189)
3.9 超导量子干涉器件法	(191)
3.10 调配反射计法	(192)
3.11 Q值法	(193)
3.12 扫频法	(194)
4 衰减计量器具的量值传递	(194)
4.1 衰减计量器具检定系统	(195)
4.2 衰减计量器具检定规程	(196)
4.3 衰减计量质量保证方案	(196)
5 衰减量值的国际比对	(196)
5.1 衰减国际比对简要概况	(196)
5.2 30MHz衰减国际比对	(197)

第6章 射频和微波相移

1 相移测量的名词	(200)
1.1 相位、初相、相位差	(200)
1.2 相移、插入相移、差值相移	(200)
1.3 本征相移、视在相位变化和失配误差	(201)
1.4 相移测量系统和相位计的有关术语 ..	(202)
1.5 相移的单位	(202)
2 常用移相器	(202)
2.1 阻容移相器	(202)
2.2 电感移相器	(204)
2.3 感应分压器移相器	(204)
2.4 伸缩线型移相器	(205)
2.5 移动介质片型移相器	(207)
2.6 旋转介质片移相器	(208)
2.7 反射移相器	(209)
2.8 电控移相器	(210)
3 测量相移的各种方法	(211)
3.1 示波器法	(211)
3.2 矢量法	(215)
3.3 零交叉检波法	(216)
3.4 开槽线法	(219)
3.5 高频替代法	(221)
3.6 调制副载波法	(222)

3.7	频率变换法	(224)
3.8	标准频率法	(226)
3.9	自校准法	(227)
4	相移测量的主要误差和抑制措施	(229)
4.1	阻抗误差	(230)
4.2	信号源谐波失真引入的误差	(231)
4.3	信号源频率不稳(包括频率不准)引入的误差	(232)
4.4	交叉耦合误差	(232)
4.5	失配反射交叉耦合误差	(234)
4.6	寄生调制误差	(234)
4.7	失配误差	(235)
4.8	幅相误差	(237)
4.9	偶然误差	(238)
4.10	零点漂移	(238)
5	国内外相移计量和测试概况	(239)
5.1	各国相移基、标准概况	(239)
5.2	各国相移测量仪器及移相器概况	(241)

第7章 微波阻抗

1	微波阻抗测量的基本概念	(253)
1.1	微波阻抗的有关术语	(253)
1.2	微波阻抗各参量之间的关系	(254)
1.3	归一化阻抗与波导中的阻抗概念	(256)
1.4	驻波比误差与反射系数数模误差的换算	(256)
2	微波阻抗测量技术	(256)
2.1	微波阻抗测量方法分类	(256)
2.2	开槽测量线法	(257)
2.3	反射计法和电桥法	(265)
2.4	标量分析法	(273)
2.5	矢量分析法	(277)
3	微波阻抗基准	(292)
3.1	微波阻抗标准器	(292)
3.2	三厘米微波阻抗基准	(296)
3.3	建立微波阻抗基准的新技术	(300)

第8章 集总参数射频阻抗

1	基本概念	(302)
1.1	定义、术语、等效电路	(302)
1.2	集总参数射频阻抗标准量具的技术特性表示法	(304)
2	射频阻抗测量方法	(304)
2.1	概述	(304)

2.2	射频阻抗测量方法分类比较	(305)
2.3	典型射频阻抗测量仪器简介	(307)
2.4	射频阻抗测量特例——介质材料电性能测量	(311)
2.5	射频阻抗测量中的连接头及转换	(312)
3	射(高)频阻抗计量器具及检定系统	(313)
3.1	射(高)频阻抗计量基准器具	(313)
3.2	高频集总参数阻抗标准器具	(314)
3.3	高频集总参数阻抗工作量具	(316)
3.4	射(高)频阻抗计量器具检定系统	(317)
4	射(高)频阻抗计量器具典型检定规程	(317)
4.1	国家级射(高)频阻抗计量器具检定规程	(317)
4.2	射(高)频阻抗计量器具典型检定规程介绍	(317)
5	射(高)频阻抗计量和测试设备分类总览	(321)
5.1	射(高)频阻抗计量设备设计与应用概况	(321)
5.2	按用途分类的射(高)频阻抗计量设备	(322)
5.3	LCR 测量仪	(324)
5.4	高频/射频(HF/RF)阻抗分析仪	(325)
5.5	阻抗/增益-相位分析仪	(325)
5.6	Q 测量仪	(325)
5.7	电介质测量仪	(326)
5.8	模拟式高频阻抗仪	(326)
6	射(高)频阻抗计量器具汇总	(327)

第9章 微波介质电特性测量

1	概述	(338)
1.1	复数介电常数	(338)
1.2	微波复介电常数测量方法分类	(338)
2	传输线法	(339)
2.1	终端短路法	(339)
2.2	终端短路“开路”法	(342)
2.3	长样品法	(343)
2.4	同轴测量线法	(344)
2.5	同轴线终端开路法	(344)
2.6	传输线法介质样品的制备	(346)
2.7	传输线法的主要误差源	(347)
3	闭腔谐振法	(347)

3.1	H_{01n} 圆柱谐振腔	(347)
3.2	H_{01n} 谐振腔法	(350)
3.3	微扰法	(356)
3.4	可复制几何形状样品的谐振腔法	(357)
4	开腔谐振法	(360)
4.1	高Q开腔谐振法	(360)
4.2	介质谐振腔法	(363)
5	微波电桥法	(365)
5.1	液体电桥法	(365)
5.2	空间电桥法	(366)
5.3	波导电桥法	(366)
6	时域法	(367)
6.1	同轴线终端短路时域法	(367)
6.2	终端电容法	(368)
6.3	同轴线终端开路时域法	(368)

第10章 微波网络分析和测量

1	微波网络的理论基础	(370)
1.1	任意截面波导中场的通解	(370)
1.2	波导中的 v 和 i	(371)
1.3	波导接头的矩阵表述	(372)
1.4	功率关系和互易性	(374)
1.5	阻抗和功率的再归一化	(376)
1.6	关于矩阵的一些定义和运算法则	(378)
2	微波网络分析方法	(380)
2.1	线性网络参数	(380)
2.2	散射矩阵	(381)
2.3	波导接头的网络表征	(385)
2.4	信号流程图	(394)
2.5	线性分式变换	(397)
3	微波网络分析仪	(400)
3.1	二端口网络S参数测量原理	(401)
3.2	微波自动网络分析仪(ANA)的基本原理	(401)
3.3	各种网络分析仪方案介绍	(406)
3.4	各种S参数测试单元及其误差模型	(415)
3.5	网络分析仪的校准	(420)
3.6	不确定度估算	(424)
3.7	自动网络分析仪的时域变换功能	(426)
4	六端口测量技术	(428)
4.1	六端口技术测量原理	(428)
4.2	六端口电路的几何解释	(431)
4.3	六端口电路的设计考虑	(432)
4.4	六端口反射计的不同数学模型	(433)

4.5	实用六端口电路理想响应的分析	(436)
4.6	专用六端口接头简介	(443)
4.7	六端口反射计的常用校准方法	(445)
4.8	双六端口网络分析仪	(451)

第11章 场强与干扰的计量测试

1	基础理论	(459)
1.1	电磁场的基本方程	(459)
1.2	玻印廷定律及其矢量	(460)
1.3	电磁场的边界条件	(460)
1.4	平面波	(461)
1.5	电磁波的传播与电磁环境	(461)
1.6	辐射场区	(462)
1.7	极化	(464)
2	测量场强和辐射干扰的常用天线	(465)
2.1	天线的主要电气参数	(465)
2.2	常用天线型式	(469)
2.3	标准天线型式	(479)
2.4	宽带有源各向同性天线	(484)
3	测试场地及其环境	(485)
3.1	开阔场	(485)
3.2	屏蔽室	(486)
3.3	电波暗室	(487)
3.4	横电磁波传输室(TEM室)	(488)
3.5	混响室	(491)
4	电磁干扰及其防护	(493)
4.1	电磁干扰源	(493)
4.2	电磁干扰的传播路径	(495)
4.3	电磁屏蔽	(497)
4.4	电子设备的接地	(499)
4.5	电源滤波	(501)
5	电磁干扰的测量技术	(502)
5.1	电磁干扰的测量设备	(502)
5.2	电磁干扰测量仪主要特性的测量	(508)
5.3	传导干扰的测量方法	(509)
5.4	辐射干扰的测试方法	(510)
6	远区场测量技术	(512)
6.1	远区场强计的组成	(512)
6.2	工作原理	(513)
6.3	场强计的额定工作条件及主要指标	(513)
6.4	场强计天线的传输系数的测量	(513)
6.5	远区场强计的自身泄漏与抑制	(514)
6.6	天线辐射特性的测量	(514)
7	近区场测量技术	(515)

7.1 概述	(515)	3.10 数字取样技术	(568)
7.2 近区场强计	(516)	3.11 数字化示波器的检定方法	(569)
7.3 各向同性探头的等效电路及频响	(517)	4 脉冲信号发生器的检定测试	(570)
7.4 校准方法	(519)	4.1 脉冲信号发生器分类	(570)
7.5 近区弱场测量	(520)	4.2 脉冲信号发生器的主要技术指标	(571)
7.6 近场扫描技术	(521)	4.3 脉冲信号发生器检定测试的基本条件	(571)
8 场强标准	(526)	4.4 脉冲信号发生器的测试方法	(571)
8.1 磁场标准(30Hz~50MHz)	(526)	5 示波器校准仪原理与应用	(573)
8.2 电场标准(25~1 000MHz)	(527)	5.1 概述	(573)
8.3 电场标准(30kHz~300MHz)	(529)	5.2 时标产生原理	(575)
8.4 开口波导和角锥喇叭天线法	(531)	5.3 脉冲幅度标准产生原理	(578)
8.5 矩形波导和矩形同轴线(即 TEM 室)法	(531)	5.4 脉冲幅度比较器原理	(582)
8.6 电小球法(高频电场标准)	(532)	5.5 快沿脉冲发生器原理	(582)
8.7 平行板电容器法(高频电场标准)	(532)	5.6 校准仪的误差表示	(585)
8.8 平行双线电场标准(高频场强标准)	(533)	5.7 正弦稳幅信号发生器	(590)
8.9 长线天线电场标准(14kHz~30MHz)	(533)	6 精密脉冲幅度测量	(591)

第 12 章 脉冲参数

1 基本概念	(535)	7 自动脉冲测试系统	(594)
1.1 脉冲术语和定义	(535)	第 13 章 失真参数的计量测试	
1.2 关于通用示波器的术语和定义	(539)	1 基本概念	(596)
1.3 关于取样示波器的术语	(543)	1.1 失真的概念与测量意义	(596)
1.4 关于数字存储示波器的术语	(544)	1.2 失真的分类及其表征	(597)
1.5 典型脉冲的频谱分析	(544)	1.3 常用名词	(597)
1.6 脉冲通过线性系统	(549)	2 非线性失真的测量技术	(599)
1.7 脉冲参数的转换与合成	(552)	2.1 非线性失真测量方法分类简述	(599)
2 示波器技术指标的检定测试	(553)	2.2 信号非线性失真的测量方法	(599)
2.1 示波器的发展概况及其分类	(553)	2.3 超低失真的测量方法	(602)
2.2 示波器的主要技术指标	(555)	2.4 传输网络非线性失真的测量方法	(604)
2.3 示波器检定测试的一般规定	(555)	3 失真度测量仪	(608)
2.4 通用示波器的测试方法	(556)	3.1 失真度测量仪的分类	(608)
3 数字式示波器原理	(561)	3.2 失真度测量仪的工作原理	(609)
3.1 概述	(561)	3.3 失真度测量仪的主要技术指标	(609)
3.2 分辨率和准确度	(562)	3.4 失真度测量仪的误差	(610)
3.3 模-数转换器(A/D)和数-模转换器(D/A)	(563)	3.5 失真度测量仪的应用及注意事项	(616)
3.4 波形显示技术	(563)	4 标准失真源	(616)
3.5 波形显示方式	(566)	4.1 标准失真源的用途及设计原则	(616)
3.6 波形参数的自动测量	(566)	4.2 标准失真源的几种组成方案	(617)
3.7 有效存储带宽	(566)	4.3 标准失真源的主要技术指标	(620)
3.8 有效上升时间	(566)	4.4 标准失真源的主要误差	(621)
3.9 同步触发功能	(567)		

4.5	标准失真源的应用及注意事项	(624)
5	非线性失真系数的量值传递	(624)
5.1	量值传递的方式及意义	(624)
5.2	失真度测量仪的检定方法	(624)
5.3	标准失真源的检定方法	(628)

第14章 调制参数的计量测试

1	基本概念	(630)
1.1	调制及其分类	(630)
1.2	调制测量的意义及其表征	(630)
1.3	调制波的基本特性	(631)
1.4	常用名词、术语及定义	(635)
2	调幅度 m 的测量方法	(637)
2.1	包络波形测量法	(637)
2.2	频谱分析法	(643)
2.3	功率法	(645)
2.4	检波法	(647)
3	频偏的测量方法	(650)
3.1	计数器平均值法	(650)
3.2	示波器零拍法	(651)
3.3	示波器极值法	(652)
3.4	贝塞尔函数零值法	(654)
3.5	频谱分析有效带宽法	(655)
3.6	频谱幅度比值法	(656)
3.7	鉴频器法	(657)
4	调制度测量仪	(658)
4.1	调制度测量仪的分类	(658)
4.2	调制度测量仪的组成及工作原理	(658)
4.3	调制度测量仪的主要技术指标	(660)
4.4	调制度测量仪的应用及注意事项	(660)
5	调制参数的量值传递	(664)
5.1	调幅与频偏量值传递概况	(664)
5.2	调制度测量仪的检定方法	(664)

第15章 半导体材料电参数

1	硅单晶电阻率测量	(669)
1.1	电阻率测量的基本方法	(669)
1.2	直线四探针电阻率测量	(672)
1.3	硅单晶电阻率计量标准	(680)
2	扩展电阻探针测量	(681)
2.1	基本原理	(681)
2.2	扩展电阻探针校准曲线	(683)
2.3	扩展电阻测量装置	(684)
2.4	扩展电阻探针应用举例	(684)

3	硅单晶非平衡少数载流子寿命测量	(687)
3.1	概述	(687)
3.2	直流光电导衰减法测量原理	(688)
3.3	测量装置	(689)
3.4	样品制备	(690)
3.5	测量条件	(691)
3.6	从衰减指数曲线读取寿命值的方法	(692)
4	杂质半导体单晶霍尔系数和霍尔迁移率的测量	(693)
4.1	霍尔效应	(693)
4.2	样品制备	(695)
4.3	样品成型	(695)
4.4	接触电极制备	(696)
4.5	测量设备	(697)
4.6	测量电路	(698)
4.7	测量步骤	(698)
4.8	霍尔电位差测量中有关几个副效应的消除	(698)
4.9	霍尔电位测量	(698)
4.10	电阻率测量	(700)
4.11	数据处理	(701)
4.12	误差分析	(703)
4.13	测量报告	(703)
5	高频 $C-V$ 测量技术	(704)
5.1	高频 PN 结 $C-V$ 测量	(704)
5.2	高频 MOS 结构 $C-V$ 测量	(708)
6	微电子图形薄层电阻的测量	(711)
6.1	范德堡测量原理	(711)
6.2	薄层电阻测试结构及其制备	(711)
6.3	测试方法	(711)
6.4	希腊十字形薄层电阻误差分析	(712)

第16章 信号发生器

1	概述	(713)
1.1	信号发生器测量意义及分类	(713)
1.2	信号发生器有关术语	(714)
1.3	输出电平的表示方法和它们之间的换算关系	(716)
2	信号发生器测量技术	(720)
2.1	信号发生器的测量方法及分类	(720)
2.2	频率测量	(720)
2.3	信号发生器输出电压(功率)的测量	(725)
2.4	衰减测量	(732)

2.5 调幅系数测量	(734)	3.1 计数式频率计	(745)
2.6 频偏测量	(738)	3.2 峰值响应电压表	(746)
2.7 失真系数测量	(739)	3.3 DO-1 补偿式电压表	(746)
2.8 谐波测量和分谐波测量	(741)	3.4 校准接收机	(747)
2.9 寄生参量的测量	(741)	3.5 调制度测量仪	(751)
2.10 源阻抗和输出阻抗的测量	(743)	3.6 失真度测量仪	(752)
2.11 辐射的测量	(744)	3.7 8902A 测量接收机	(753)
3 测量信号发生器的标准仪器	(745)	参考文献	(758)

第 1 章 概 论

1 电子计量测试的基础知识

1.1 电磁波频谱的划分

到目前为止,电子计量测试主要涉及的是无线电电子技术的宏观方面,即与占有很宽频谱范围的电磁波(这种电磁波在自由空间或者在传输线内传输)有关的各种电磁参量的计量测试。

电磁波是电磁场的一种运动形态。它以交变的电场和磁场相互作用、相互依赖而存在,是电场和磁场的波动运动,这种运动的能量以光速或以小于光速的速度在有限区域中传播。

电磁波的频谱范围非常宽广。频率从几十 Hz(甚至更低)到 3 000GHz(波长从几万千米到 0.1 毫米),整个频谱范围内的电磁波称为无线电波。电子计量测试正是在这一频谱范围内开展工作的。对如此宽广的频谱范围通常可划分成若干波段,各波段具有不同的特性和用途。因此了解这些频段或波段的划分对开展电子计量测试来说是很有必要的。需要指出,这些划分不是很严格的,也不是一成不变的,彼此之间是互相重叠的。

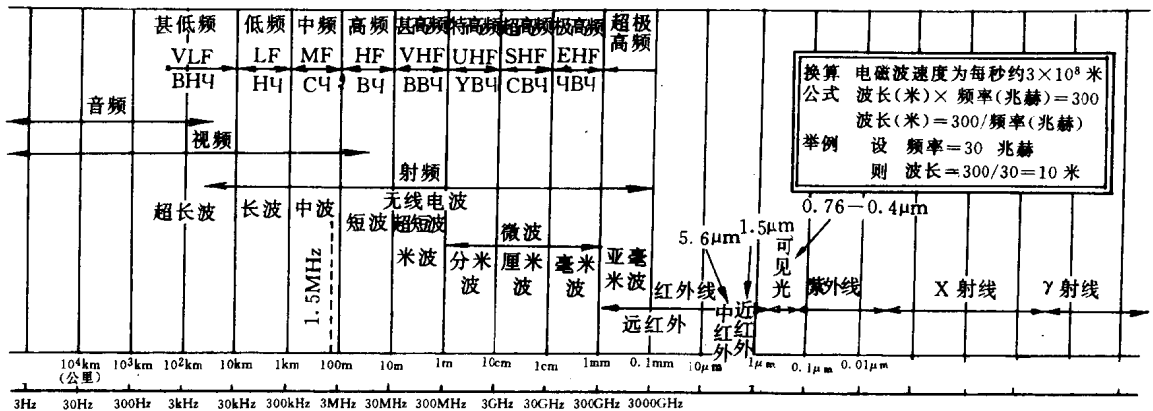


图 1-1 电磁波频谱划分

由图 1-1 可知,这种划分既可按频率也可按波长进行。如按频率划分,可分为甚低频(VLF)、低频(LF)、中频(MF)、高频(HF)、甚高频(VHF)、超高频(UHF)、特高频(SHF)和极高频(EHF)。如按波长划分,可分为甚长波(VLW)、长波(LW)、中波(MW)、短波(SW)、米波、分米波、厘米波、毫米波、亚毫米波。

除了上述较细的划分外,在电子计量测试中还经常用到几个比较笼统的术语,即超低频、高频、射频、微波、毫米波和亚毫米波等。这里“高频”一词和上述按频率细分的高频段(3MHz 到 30MHz)不同,按我国的习惯,通常它指的是覆盖约 1MHz 到 300MHz 的较宽频率范围。从某种意义上是为在频率或波长上区别于“微波”的一种广义的称谓。但按西方国家习惯,他们往往赋予“高频”以更宽的频率范围,即从 1MHz 到 110GHz 覆盖了他们称之“射

频”和“微波”的极宽频率范围。

对“射频”一词有两种理解，一种认为射频即高频，因此很多西方国家把我们称为无线电计量或电子计量的计量范畴称为射频和微波计量(RF and Microwave Measurement)。另一种理解符合我国习惯，认为射频覆盖的频率范围很宽，即高于音频的无线电波均属射频范围。因此很多国家把电子计量也简称为射频计量。

“微波”指的是波长约从1m到1mm(相应的频率约从300MHz到300GHz)的电磁波。这段电磁波频谱包括分米波、厘米波和毫米波等波段。对这一“微波”范围，可按若干种分法将其细分为若干较小的频段。在雷达和常规的微波技术中，常用拉丁字母代号表示更细的波段划分(如表1-1)。

按标准波导的频段划分，其字母代号不甚统一，多数采用的情况如表1-2。

按某些微波信号源及元器件所采用的工作频段划分如表1-3。

表 1-1 按拉丁字母代号的波段划分

代 号	频率(GHz)
L	1~2
S	2~4
C	4~8
X	8~12
K _u	12~18
K	18~27
K _a	27~40

表 1-2

频段代号	频率范围(GHz)	频段代号	频率范围(GHz)
UHF	0.3~1.12	K _a	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	50.0~75.0
C	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
K _u	12.4~18.0	R	220.0~325.0
K	18.0~26.5		

表 1-3

频段代号	频率范围
VHF	100~300MHz
UHF	300MHz~1.0GHz
L	1.0~2.0GHz
S	2.0~4.0GHz
C	4.0~8.0GHz
X	8.0~12.4GHz
K _u	12.4~18.0GHz
K	18.0~26.5GHz
K _a	26.5~40.0GHz

美国国防部在1970年采用的一种新的军用微波频段划分如表1-4。

表 1-4

频段代号	频率范围(GHz)	频段代号	频率范围(GHz)
A	0.1~0.25	H	6.0~8.0
B	0.25~0.5	I	8.0~10.0
C	0.5~1.0	J	10.0~20.0
D	1.0~2.0	K	20.0~40.0
E	2.0~3.0	L	40.0~60.0
F	3.0~4.0	M	60.0~100.0
G	4.0~6.0		

由上述四表可以看出，这种划分和采用的代号是很不统一的。另外，有些国家把“微波”对应的频段高端规定为30GHz，即局限于厘米波段，以突出毫米波段的重要性和特殊性。与此相反，也有把短于1mm的电磁波段(即亚毫米波段)也归入“微波”范围，而且认为它是现代微波研究的一个重要领域。

“毫米波”指的是波长为10~1mm(频率为30~300GHz)的电磁波。

毫米波理论和技术是微波理论和技术向高端的延伸。工程界和一些公司又将毫米波段划分成若干小的波段并用不同的字母代号表示。目前，国际上比较流行采用美国电子工业协会(EIA)和美军新毫米波波段的字母代号和频率划分(如表1-5)。毫米波的波长短、频带宽以及大气吸收在此频带内有窗口等特点使其具有保密性高、信息容

量大等一系列优点,从而在通信、雷达、制导、射电天文、遥感等领域有良好的开发利用前景。

表 1-5

波段代号	K	K _a	Q	U	V	E	W	F	D	G	M(Y)	J
频率 GHz	18~26.5	26.5~40	33~50	40~60	50~75	60~90	75~110	90~140	110~170	140~220	170~260	220~325

“亚毫米波”指的是波长约为 1~0.03mm 的电磁波。其波长介于微波和红外波段之间且和远红外波段有重叠。由于波长短,波导传输的损耗大,且对元、器件的机械加工精度要求高,因此亚毫米波测量很少用微波技术中常用的波导传输线和元、器件,而是沿用光学测量的方法。

1.2 集总参数与分布参数

随着频率的提高,电路元件和电路特性的描述也应随之变化。众所周知,阻抗是表示物质或电路的电特性的量。在频率从低频到高频甚至延伸到甚高频,电路和元件的尺寸与波长相比足够小,电路元件可以考虑为集中在某些点上,电路特性可用理想化的或较纯的元件参数(电阻、电容、电感)或电压与电流的复数比(阻抗)或其倒数(导纳)等表示,这类参数称为集总参数。随着频率的提高,获得纯的集总参数元件 R 、 L 、 C 便越来越困难了,连接元件的引线阻抗已不能忽略。因此,当电路尺寸与波长相比足够大时,所有电路元件可考虑是均匀分布在电路中的各点,此时电路特性的描述只能使用分布参数概念。在分布参数电路中,线上的电压和电流不仅随时间而变,而且随空间(即沿线位置)而变。阻抗的定义也应改为分布参数阻抗和电压驻波比、反射参量。

使用集总参数分析的频率范围与使用分布参数分析的频率范围二者之间并无明确的界限。例如,即使在 1GHz 以上,也可把插入同轴线中的探针看成一种集总参数概念的容性分压器;而另一方面,分布参数阻抗测量技术不仅适用于微波频率,也适用于甚高频段,低端可达几十 MHz 甚至几十 kHz。例如,在频率低至 30kHz 时,空气线阻抗标准的分析方法仍采用分布参数概念。

1.3 传输线

众所周知,在直流和低频电路中,连接电路元件可用一般的导线。随着频率的提高,必须考虑电路的电磁波辐射的影响。为此,广泛采用将电磁波限于一定空间范围内的传输线。

传输线理论和它的结构不仅对无线电电子技术是至关重要的,对电子计量测试系统的构成和分析也有重要意义。有些电子计量测试仪表,如同轴或波导测量线、反射计、阻抗分析仪、截止式衰减器等的工作原理就是建立在对特定传输线内电磁场结构分析的基础上的。

传输线是以横电磁(TEM)模的方式传输电能和(或)电信号的导波结构。传输线的特点是其横向尺寸远小于电磁波的工作波长。它可以是(1)金属导体构成的双导体结构:平行双导线、平行多导线、同轴线、带状线和工作于准 TEM 模的微带线;(2)金属导体构成的各种传输 TE 模、TM 模或其混合模的单导体结构,一种广义传输线——波导(波导截面有矩形、圆形和异形之分);(3)电介质构成的表面波波导和光导纤维等。

对双导体结构的传输线,可借助于简单的双导线模型进行电路分析。对单导体结构的波导,其中电磁场沿传播方向的分布规律与双导线传输线上的电压、电流情形相似,可用等效传输线的观点加以分析。

在上述诸多传输线型式中,金属同轴线和矩形波导在电子技术和电子计量测试中的应用最为广泛。同轴线的内导体外直径和外导体内直径决定了它的机械尺寸和阻抗特性。其特性阻抗由 $Z_0 = 60 \ln \frac{D}{d}$ 决定,式中, D 为同轴线外导体内直径; d 为同轴线上导体外直径。通常选取同轴线尺寸使 $Z_0 = 50\Omega$,在某些应用中也有选取 $Z_0 = 75\Omega$ 的。比较常用的有 3.5mm 同轴线(3.50 × 1.52mm)、7mm 同轴线(7 × 3.04mm)和 14mm 同轴线(14.288 × 6.204mm)等。

除了截面尺寸,对于同轴线还有多种接头形式,如 N 型、M 型、精密平面接头等和多种接头阻抗(50Ω、75Ω 等)。表 1-6 列出了一些接头型号、分类符号和典型商品实例。精密同轴型接头按 IEEE 技术条件定义。