

电子计量考核教材

无线电基本参量

(电压 功率 衰减 相位 阻抗 失真)

中国计量科学研究院无线电处

国防科工委第二计量测试研究中心 合编

电子工业部计量测试研究中心站



中国计量出版社

内 容 提 要

全国计量检定人员考核委员会无线电、时间频率、电子元件分委员会编写一套电子计量测试考核教材,本书为无线电基本参量分册,主要包括电压、功率、衰减、相位、阻抗、失真六篇,着重介绍各参量计量测试的概念、定义和名词术语,检定计量器具的工作标准,各种测量技术和方法,计量测试中应注意的问题等。每章附有思考题,供读者理解和掌握书中内容。

本书是供全国电子计量测试、检定人员进行培训和考核使用的教材,已得到全国计量检定人员考核委员会办公室的认可和批准。

电子计量考核教材

无 线 电 基 本 参 量

(电压 功率 衰减 相位 阻抗 失真)

中国计量科学研究院无线电处

国防科工委第二计量测试研究中心 合编

电子工业部计量测试研究中心站

—*—

中国计量出版社出版

北京和平里1187号

中国计量出版社印刷厂印刷

—*—

开本 787×1092/32 印张14 字数 312 千字

1987 年 6 月第 1 版 1987 年 6 月第 1 次印刷

定价 3.20元

统一书号 15210·743

(内部发行)

电子计量考核教材编委会

郭群芳 贾树清 常新华

王洪汤 席德熊 赵 基

吴 昕 张关汉

本书执笔人（审稿人）

周信豪（陆洪伟）（第一篇）

冯新善（张廷柱）（第二篇）

宋孟宗（叶德培）（第三篇）

徐燕清（贾文田）（第四篇）

胡希平（董雨瑞）（第五篇）

翁昌瑜（王原俭）（第六篇）

前 言

为贯彻落实计量法、提高电子计量测试专业队伍的素质,根据全国计量检定人员考核委员会的规定,要在全国范围内对从事电子计量测试的人员进行培训和考核。培训需要统一的教材,考核需要统一的出题范围。为适应这一需要,全国计量检定人员考核委员会无线电、时间频率、电子元器件分会决定组编一套电子计量测试考核教材。这一决定得到全国计量检定人员考核委员会办公室的认可和国防科工委标准计量局的大力支持,也得到了中国计量科学研究院无线电处、国防科工委第二计量测试研究中心、航天部二院 203 研究所、电子工业部计量测试研究中心等单位的有关专家积极响应,并投入了这套教材的编写、审校工作。

这套教材计划按器件和参量分册出版,其中有电子元件阻抗参量分册;半导体分立器件和集成电路分册。无线电基本参量包括时间频率、电压、功率、衰减、相位、微波阻抗、噪声、场强、脉冲、失真度、调制度、信号源、超低频等。

根据这套教材的编写目的,着重阐述:有关参量计量测试的主要概念、定义和名词术语;各级标准以直接检定计量器具的工作标准为主;各种测量技术和方法;计量测试中应注意的问题。每一分册都附有大量的思考题,回答这些思考题的基础知识均能在书中找到。有关参量的检定系统表及其说明书应作为其重要内容,但由于这些检定系统表均在修订过程中,此次均未编入。

本书编委会对书稿的编写、审稿进行了认真的工作,执

笔者也做了很大努力，但因时间仓促，书中疏漏和错误之处在所难免，希望读者批评指正。

中国计量科学研究院无线电处
国防科工委第二计量测试研究中心
电子工业部计量测试研究中心站

1986年11月

目 录

第一篇 电 压

第一章 基本概念	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 几个常用的名词术语	(1)
第三节 电压表的误差关系	(4)
复习思考题	(6)
第二章 电压测量仪表	(7)
第一节 概述	(7)
第二节 峰值响应的电压表	(8)
第三节 平均值响应电压表	(18)
第四节 有效值响应电压表	(19)
第五节 取样电压表	(26)
第六节 数字式射频频毫伏表	(30)
第七节 外差式电压表	(32)
复习思考题	(35)
第三章 电压标准	(36)
第一节 概述	(36)
第二节 补偿式电压表	(37)
第三节 热电转换标准	(39)
第四节 微电位计	(41)
第五节 测辐射热计式电压标准	(44)
第六节 用衰减器扩大电压范围	(55)
第七节 小结	(57)

复习思考题	(59)
第四章 电压测量误差	(60)
第一节 概述	(60)
第二节 人为误差	(60)
第三节 传输线误差	(62)
第四节 负载效应	(67)
第五节 失配误差	(71)
第六节 波形误差	(72)
第七节 地电流和泄漏误差	(73)
第八节 降低测量误差的一些措施	(74)
复习思考题	(76)

第二篇 功 率

第一章 高频和微波功率计量测试的一些基本概念	(77)
第一节 概述	(77)
第二节 功率的不同定义和表达式	(78)
第三节 二端口网络对信号源反射系数的影响	(79)
第四节 低反射系数等效信号源	(81)
复习思考题	(83)
第二章 高频和微波功率的测量方法	(84)
第一节 测辐射热式功率计	(84)
第二节 热电偶式功率计	(97)
第三节 晶体二极管式功率计	(98)
第四节 量热式功率计	(99)
复习思考题	(101)
第三章 高频和微波小功率基准	(102)
第一节 量热式小功率基准	(102)
第二节 微量热式小功率基准	(103)
复习思考题	(105)

第四章 功率座的校准方法	(106)
第一节 交替比较法	(107)
第二节 交替比较法的误差分析	(109)
第三节 单定向耦合器比较法	(115)
第四节 反射计法	(118)
第五节 功率方程法	(122)
第六节 不同接头型式的功率座的校准	(12)
复习思考题	(123)
第五章 微波中、大功率的测量	(124)
第一节 水负载流量热计	(124)
第二节 衰减器法	(125)
第三节 级联定向耦合器法	(127)
复习思考题	(131)
第六章 微波脉冲峰值功率的测量	(132)
第一节 平均功率法	(132)
第二节 晶体检波——视频斩波法	(134)
第三节 取样比较法	(135)
第四节 陷波功率计	(137)
复习思考题	(139)

第三篇 衰 减

第一章 衰减计量测试中的一些基本知识	(140)
第一节 衰减计量测试的对象和内容	(140)
第二节 表征高频和微波器件特性的网络参量	(140)
第三节 实际系统中的信号传输过程与网络参量的 关系	(143)
第四节 衰减量和衰减增量的定义	(146)
第五节 衰减计量测试中的失配误差	(151)
复习思考题	(154)

第二章 标准衰减器	(155)
第一节 波导截止式衰减器	(156)
第二节 感应分压器	(159)
第三节 回转式衰减器	(161)
第四节 电阻式步进衰减器	(164)
第五节 波导吸收式衰减器	(166)
复习思考题	(167)
第三章 衰减测量方法	(168)
第一节 通过与衰减基准器或标准衰减器比较、替代的衰减测量方法	(169)
第二节 通过功率比或电压比测量的衰减测量方法	(177)
复习思考题	(181)
第四章 衰减计量测试中的一些共同问题	(182)
第一节 对信号源的要求	(182)
第二节 匹配问题	(184)
第三节 各种衰减测量方法的电平上限非线性误差问题	(185)
第四节 噪声引起的衰减测量误差	(186)
第五节 信号泄漏和地回路电流	(188)
复习思考题	(192)

第四篇 相 位

第一章 基本概念	(194)
第一节 相位和相位差、相移	(194)
第二节 绝对相移和相对相移	(195)
第三节 本征相移、视在相位变化和失配误差	(197)
第四节 相移的单位	(197)
复习思考题	(198)
第二章 常用相移器	(199)

第一节	伸缩线型相移器	(199)
第二节	移动介质片型相移器	(201)
第三节	旋转介质片型相移器	(202)
第四节	反射型相移器	(205)
	复习思考题	(207)
第三章	相移测量方法和相位计	(208)
第一节	高频替代法	(208)
第二节	调制副载波法	(213)
第三节	频率变换法	(216)
	复习思考题	(231)
第四章	相移测量的误差分析和相移检定中的注意事项	(232)
第一节	信号源频率不稳引入的误差	(232)
第二节	交叉耦合误差	(236)
第三节	寄生调频误差	(244)
第四节	失配误差	(247)
第五节	信号源谐波失真引入的误差	(257)
第六节	偶然误差	(260)
第七节	零点漂移	(261)
第八节	幅相误差	(262)
	复习思考题	(267)

第五篇 微波阻抗

第一章	微波阻抗的术语和定义	(268)
第一节	分布参数阻抗和驻波、反射参量	(268)
第二节	阻抗参量间的关系	(273)
第三节	s 参量和回波损失	(279)
第四节	同轴线和波导中的阻抗概念	(281)
	复习思考题	(283)
第二章	微波阻抗的标准器和标准装置	(284)

第一节 概述	(284)
第二节 特性阻抗标准器	(285)
第三节 反射系数标准器	(289)
第四节 传递工作标准器——标准负载	(290)
第五节 微波阻抗的标准测量装置	(295)
复习思考题	(296)
第三章 驻波和反射的测量	(297)
第一节 测量方法概述	(297)
第二节 开槽测量线法	(298)
第三节 反射计法和电桥法	(306)
第四节 驻波比电桥	(311)
第五节 调配反射计	(313)
第六节 扫频反射计	(316)
第七节 标量网络分析仪	(319)
第八节 阻抗和网络分析仪	(324)
第九节 六端口技术	(331)
复习思考题	(339)
第四章 开槽测量线的检定	(341)
第一节 概述	(341)
第二节 开槽测量线的误差来源	(342)
第三节 开槽测量线的总误差	(346)
第四节 开槽测量线的检定	(348)
复习思考题	(348)

第六篇 非线性失真

第一章 非线性失真系数及其测量原理	(350)
第一节 概述	(350)
第二节 非线性失真系数的定义	(352)
第三节 非线性失真系数的测量方法	(353)

第四节 失真中的电压测量	(357)
复习思考题	(374)
第二章 失真度测量仪	(376)
第一节 失真度测量仪的工作原理及组成类型	(376)
第二节 失真度测量仪的基波抑制电路	(379)
第三节 失真仪的主要技术指标	(383)
第四节 失真仪的误差分析	(385)
复习思考题	(393)
第三章 标准失真源	(395)
第一节 基波加单次谐波法	(396)
第二节 基波加二、六次谐波法	(399)
第三节 基波加方法波	(404)
第四节 基波加白噪声法	(405)
复习思考题	(410)
第四章 非线性失真系数的量值传递与检定	(411)
第一节 概述	(411)
第二节 失真度测量仪的检定	(412)
第三节 失真仪检定装置的检定方法	(419)
复习思考题	(424)

第一篇 电 压

第一章 基 本 概 念

第一节 概 述

在研究各种电子设备和调整这些设备的工作状态时，电压和电流的测量是基本的测量。由于测量电压不需要破坏电路原来的工作状态，因此，表征无线电设备的工作状态主要是电压参数而不是电流参数。而且当知道电路的阻抗时，可以通过欧姆定律，把测得的电压值换算为电流值。

在无线电技术领域经常需要研究一个网络的特性，如频率特性、损耗或增益特性。最简单的测量方法就是在网络的入端接上一个已知输出电压的信号发生器，在网络的出端接上一台电压表就可以了。

正因为这样，所以在无线电计量中，电压计量是一项应用面广而又重要的基本计量。

第二节 几个常用的名词术语

电位（电势）——在电场中某一点的电势，其数值等于一个单位正电荷从该点移到无限远时电场力所做的功，即 $U_1 = - \int_1^{\infty} E dl$ 。这里 E 是电场强度， l 是积分路径。

电压（电位差）—— a 点和 b 点之间的电位差，是一个单位正电荷从 a 点移到 b 点时电场力所做的功，即 $U_{ab} =$

$-\int_1^0 E dl$ 。电位差也称作电压。无线电技术中常常把机壳电位看成是“0”电位，作为公共参考电位。

开路电压——如果电压表接上后，对被测对象无影响，这时测得的电压叫开路电压或开路电势。

有载电压——如果电压表的输入阻抗对被测对象的影响不能忽略不计时，这时测得的电压叫有载电压。当负载值与被测电源的内阻相等时，这时测得的电压叫匹配电压。在同轴传输线系统中，匹配电压是指负载值等于特性阻抗时的电压值。

峰值（幅值）——是指电压 u_x 在一个周期内的最大值。若是对零值不对称的电压，还要引入正峰值 U_{m+} 和负峰值 U_{m-} 的概念。

平均值——电压 u_x 的平均值定义为：

$$U_{op} = \frac{1}{T} \int_0^T u_x(t) dt \quad (1-1)$$

式中 T 是 u_x 的周期。

整流平均值——电压 u_x 经全波整流后的直流分量，即

$$U_{oB} = \frac{1}{T} \int_0^T |u_x(t)| dt \quad (1-2)$$

有效值——定义为电压 u_x 的均方根值，即

$$U_{rms} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T u_x^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-3)$$

有效值的平方，其数值上等于消耗在 1Ω 电阻上的平均功率。

波形因数——定义为电压有效值与整流平均值之比，即

$$K_x = U_{rms} / U_{oB} \quad (1-4)$$

波峰因数——定义为电压的峰值与有效值之比，即

$$K_m = U_m / U_{rms} \quad (1-5)$$

对于无直流分量的方波， $K_x = K_m = 1$ 。

模拟式电压表——如果电压表的示值是随被测电压量变化的连续函数，这种电压表叫作模拟式电压表。

数字式电压表——仪表能自动地测量出被测电压的离散信号，并且以数字形式显示示值。数字电压表大多数只能测量直流电压和低频电压。近年来，国外已有工作频率可达 1 GHz 以上的数字电压表。

灵敏度——表征仪表对被测量变化反应的能力，即灵敏度 S 是用被观测变量的增量与其相应的被测量的增量之商表示，即 $S = \Delta L / \Delta x$ 。这里 ΔL 是被观测变量的增量； Δx 是被测量的增量。例如，输入为 100 mV 的电压变化 10 mV 时，一台电压表变化 10 分度格，另一台变化 5 分度格；则前一台灵敏度 $S = 1$ 格/mV，后一台 $S = 0.5$ 格/mV，所以前一台灵敏度高。

稳定度——在规定的工作条件下，仪表的电性能随时间保持不变的能力。它可以用前、后两次检定结果之差来表示在一段检定周期内的稳定度。稳定度对于应用修正量修正的计量器具来讲显得特别重要。

绝对误差——测量结果（包括测量值、标称值、示值等）与被测量客观存在的真值之差，即

绝对误差 = 测量结果 - 被测量的真值。

相对误差——绝对误差与被测量的真值之比，即 相对误差 = 绝对误差 / 真值。电压表的频率附加误差用相对误差表示。

百分误差——在电压测量中，有些仪表常用读数值的百分误差来表示。它也是相对误差的一种，所不同的是它的分

母是示值（或标称值）而不是真值，即 百分误差 = 绝对误差 / 示值。

引用误差——绝对误差与仪表测量范围上限（或量程）值的比值，有时也叫满度误差。

模拟式电压表的基本误差大多数是采用引用误差来表征的。

分贝误差——是电压计量中常用来表示相对误差的一种形式。令 δ_r 为相对误差， δ_b 为分贝误差，则有

$$\pm \delta_b = 20 \log(1 \pm \delta_r) \quad (1-6)$$

或
$$\pm \delta_r = 10^{(\pm \delta_b)/20} - 1 \quad (1-7)$$

基本误差——电压表在规定的正常工作条件下所具有的误差。正常工作条件是指标准规范所规定的工作条件，如环境条件和定度频率。也叫固有误差，用引用误差表示。

频率附加误差——在其它条件与基本误差相同，仅工作频率偏移定度频率时的附加误差。它用相对误差表示。

附加误差——在超出规定的正常条件时所增加的误差。

第三节 电压表的误差关系

在无线电测量仪表中，测量电压的仪表主要是电子电压表。电子电压表的技术指标通常用基本误差和频率附加误差表征。电压表的基本误差是指电压表在规定的环境条件和技术条件，并在规定的、如 100 kHz 或 1 kHz 等频率点下，所能达到的电压测量误差限，它的数学表达式为

$$\delta_0 = \frac{U_x - U_0}{U_{f_0}} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 δ_0 ——电压表的基本误差；

U_x ——电压表的指示值；

U_0 ——在定度频率上与 U_x 指示值相对应的电压实际

值（即真值），通常用标准表的指示值代替；

U_{fs} ——电压表所在测量档的满度值。

频率附加误差是指电压表在与定度频率下工作时相同的
环境条件下工作，但是所测量的电压的工作频率偏离定度频
率时所产生的附加误差，其表达式为

$$\delta_f = \frac{U_0 - U_f}{U_f} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中 δ_f ——频率附加误差；

U_f ——电压表仍指示在 U_x 上，但工作频率为 f 时的
与 U_x 相对应的电压实际值，通常也由标准表在频率 f 下
的测得值代替。

在实际测量应用中，电压表所测量电压的频率不在定度
频率上，其电压值也不在满度值上，若要知道此时电压表的
测量误差，可以通过式（1-8）和式（1-9）导出。

由式（1-8）得：

$$\frac{U_0}{U_x} = 1 - \delta_0 \frac{U_{fs}}{U_x} \quad (1-10)$$

由式（1-9）得

$$\frac{U_0}{U_f} = (1 + \delta_f) \quad (1-11)$$

令 δ_x 是电压表测量频率为 f 、指示值为 U_x 的电压时的
测量误差，则 δ_x 有

$$\delta_x = \frac{U_x - U_f}{U_f} = \frac{U_x}{U_f} - 1 \quad (1-12)$$

式（1-11）代入式（1-10），得

$$\frac{U_x}{U_f} = \frac{1 + \delta_x}{1 - \delta_0 \frac{U_{fs}}{U_x}}$$