

无线电计量测试丛书 3

低频电压的计量测试

李世雄 彭勃伯 翁昌瑜 沈英魁 编著

内 容 提 要

本书是《无线电计量测试丛书》的第三分册，主要内容除了介绍低频电压测量的一般基础知识外，还介绍模拟电压表和数字电压表的各种不同方案和特点。并且也讨论了非正弦、噪声和超低频电压的测量问题。最后着重阐明低频电压计量标准的建立，各类电压检定装置的方案，以及各级电压标准和电压表的检定方法和测试检定中应注意的问题。

本书可供具有中等以上文化程度从事无线电计量测试和检定的工程技术人员以及大专院校有关专业的师生参考。

无线电计量测试丛书 3 低频电压的计量测试

李世雄 彭幼伯 编著
翁昌瑜 沈英魁
责任编辑 刘宝兰

—♦—

中国计量出版社出版

北京和平门内11区7号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—♦—

开本 787×1092/32 印张 12.25 字数 266 千字

1988年4月第1版 1988年4月第1次印刷

印数 1—7 000

ISBN 7-6026-0041-8/TB·37

定价 2.80 元

无线电计量测试丛书编委会

主 编: 汤世贤

副主编: 周清一 吴鸿适 张世箕 席德熊

编 委: (以姓氏笔划为序)

王义举 王立吉 戈锦初 古乐天

汤世贤 刘全宝 李世雄 吴鸿适

张世箕 张 伦 陈成仁 周清一

郭允晟 夏虎林 倪伟清 诸维明

席德熊 黄志洵

本分册责任编委: 王立吉 刘全宝

前 言

《无线电计量测试丛书》是根据中国计量出版社关于按学科分类组编计量测试丛书的总体设想和统一安排，在中国计量测试学会的高度重视和实际支持下，由本编委会邀请作者、组织编写和审订的。其目的是比较系统地传播无线电计量测试科学技术知识，促进电子学与无线电技术的发展，以适应科技进步和社会主义现代化建设的需要。

本丛书主要论述高频和微波电磁量的计量测试问题，一般不包括直流和低频的内容。丛书第一分册为“概论”，其余各分册分别阐述各主要参量及数据域的测试。“丛书”各分册既保持了相互联系，又是一本专题论著，具有独立性，因此将按成书的先后陆续出版。

本丛书的主要读者对象，是具有中等以上文化程度的无线电计量测试工作者、有关专业的科学技术人员，大专院校师生、计量管理干部，也可作为计量人员的培训用书。

无线电计量测试丛书编委会

序

电压是无线电计量的基本参量之一。在集总参数电路里。虽然电流、电压和功率均可用来表征电信号的能量，但从计量测试的观点来看，用电压比电流和功率更为简便，而且当阻抗已知时电流和功率均可由电压导出。此外，诸如调幅、失真等参量也是电压的导出量；电子仪器及设备中一些工作特性的测试，非电量的电测等也都和电压计量紧密相关。因此，电压的计量测试成为许多其他电参量计量测试的基础。

本书较系统地论述了低频电压的计量测试，着重阐明了计量标准、量值传递以及测量仪器、测量方法和测量误差。同时还讨论了非正弦（脉冲、噪声）信号及超低频电压的测量问题。第一、二两章介绍了低频电压的测量原理和特点。第三、四两章分别讨论了模拟式电压表和数字式电压表。第五章论述了脉冲、噪声及超低频等特殊信号电压的测量。第六、七两章介绍了各类电压标准（标准源和标准表）的工作原理、组成及其计量性能。第八章分析了电压测量的误差来源及其抑制方法。第九章论述了低频电压的量值传递及各级标准和量具的检定。由于电压计量测试涉及面极为广泛，不可能很全面地论述，只能给读者提供一些基本概念和原理。

本书的几位作者分工如下：李世雄（第一、二、三、四、五章）、翁昌瑜（第八、九章）、沈英魁（第六章）、彭幼伯（第七章）。本书完稿后由李世雄统稿，王立吉、刘全宝负责审校，最后由本书副主编席德熊审定。谨此一并

8810602

致谢!

限于作者的水平和经验，疏漏和错误之处在所难免，切盼读者批评指正。

作者同识

1986 年 12 月

目 录

序.....	(i)
第一章 绪 论.....	(1)
第一节 电压测量的意义与特点	(1)
一、电压测量的意义.....	(1)
二、电压的定义.....	(1)
三、电压测量的基本要求.....	(2)
第二节 电子电压表的技术指标	(5)
一、频带宽度	(6)
二、输入阻抗.....	(6)
三、灵敏度.....	(6)
四、分辨率.....	(6)
五、准确度.....	(7)
六、稳定度.....	(8)
七、响应时间.....	(9)
八、温度系数.....	(9)
九、伏特·赫兹比	(10)
十、波高率.....	(10)
十一、常模干扰.....	(10)
十二、共模干扰.....	(11)
第二章 低频电压的测量原理.....	(13)
第一节 交流电压的表征.....	(13)
一、峰值.....	(13)
二、平均值.....	(13)
三、有效值.....	(15)
四、波形因数.....	(16)

五、波峰因数(波高率)	(16)
六、中和因数	(16)
第二节 电子电压表的检波原理	(19)
一、平均值检波器	(19)
二、峰值检波器	(21)
三、峰-峰值检波器	(32)
四、有效值检波器	(33)
五、同步检波器	(41)
参考文献	(43)
第三章 模拟式交流电子电压表	(45)
第一节 检波-放大式电压表	(45)
第二节 放大-检波式电压表	(47)
一、输入电路	(48)
二、输入分压器	(49)
三、宽带定值放大器	(52)
第三节 真有效值电压表	(55)
一、波高率的要求	(56)
二、放大器的动态范围	(56)
三、放大器的频带宽	(57)
四、有效值电压表波高率的检测方法	(63)
参考文献	(68)
第四章 数字电压表(DVM)	(70)
第一节 概述	(70)
第二节 DVM的主要特点	(70)
一、量程	(70)
二、显示位数	(71)
三、分辨率	(71)
四、超量程(载)能力	(71)
五、准确度	(71)
六、测量速率	(72)
七、抗干扰能力	(73)

八、输入阻抗.....	(73)
九、程控化和自动化功能.....	(73)
第三节 直流 DVM 的基本原理.....	(73)
一、非积分式 DVM.....	(74)
二、积分式 DVM.....	(79)
三、剩余再循环原理的 DVM.....	(89)
第四节 交流电压测量的数字化方法	
——交直流 (AC/DC) 变换器.....	(93)
一、电压负反馈式 AC/DC 线性变换器.....	(93)
二、双热偶 AC/DC 线性变换器.....	(96)
三、双热三极管 AC/DC 差动变换器.....	(98)
四、反馈非线性补偿 AC/DC 变换器.....	(101)
五、应用微处理器对检波器的线性化.....	(102)
六、微处理器二次差值修正原理.....	(106)
参考文献.....	(109)
第五章 特殊信号电压的测量.....	(110)
第一节 脉冲电压的测量.....	(110)
一、脉冲示波器测量脉冲电压.....	(111)
二、直流比较法.....	(111)
三、交流比较法.....	(112)
四、峰值检波器测量脉冲电压.....	(112)
五、采样-保持法.....	(116)
第二节 噪声电压的测量.....	(117)
一、噪声电压测量的特点.....	(117)
二、平均值电压表测量噪声.....	(119)
三、峰值电压表测量噪声.....	(120)
四、真有效值电压表测量噪声.....	(121)
第三节 超低频电压的测量.....	(125)
一、超低频电压测量的特点.....	(125)
二、超低频峰值电压的测量.....	(126)

三、超低频有效值电压的测量	(129)
四、正交补偿原理	(130)
五、计算式有效值电压测量原理	(131)
六、微处理器采样控制原理	(133)
七、热偶型超低频有效值电压表	(135)
八、超低频电压校准装置	(142)
参考文献	(147)
第六章 交流标准电压源	(149)
第一节 概 述	(149)
第二节 交流标准电压源的构成	(150)
一、交流稳幅源的用途和发展	(150)
二、一种用平均值检波器做比较器的稳幅源方案	(152)
三、具有快速稳幅特点的稳幅振荡器	(154)
四、交流标准电压源的性能特征	(160)
第三节 用热偶做比较器的交流标准源实例	(160)
第四节 DO-5 精密交流标准电压源	(163)
一、DO-5 的原理方框图	(163)
二、主要电路的原理及特点	(163)
第五节 用光敏元件做比较器的交流标准源	
方案简介	(192)
一、整机方框图	(192)
二、一种用于较高频段小电压测量的标准源方案	(196)
第六节 带 μP 的具有自动校准功能的交流标准源	(198)
一、方框图的构成及整机特点	(198)
二、主要电路原理及特点	(201)
第七节 工频标准源	(215)
一、概 述	(215)
二、方框图构成及其特点	(215)
第八节 DO-30 型三用表校验仪	(218)
一、原理及特点概述	(218)
二、交流电压及电流输出部分	(219)

第九节	DYB-2型电子管电压表检定仪	(221)
一、概述	(221)	
二、方框图构成及其特点	(221)	
第十节	交流标准源的正确使用	(223)
一、几个主要的技术特性	(223)	
二、交流标准电压源的正确使用	(225)	
三、自动测试系统与交流标准源	(226)	
参考文献	(227)	
第七章	交直流电压转换标准	(228)
第一节	热偶型交直流转换标准	(228)
一、概述	(228)	
二、热偶的原理与特性	(229)	
三、热偶型交直流转换标准	(235)	
四、几种热电转换标准的方案介绍	(250)	
五、采用多元热偶的交直流转换标准	(256)	
六、高输入阻抗双热偶型差动电压表	(264)	
第二节	热敏电阻电桥型精密有效值电压表	(270)
一、热敏电阻	(270)	
二、工作原理与特点	(272)	
三、误差分析	(275)	
第三节	感应分压器及其应用	(276)
一、感应分压器的原理	(277)	
二、感应分压器的应用	(284)	
参考文献	(287)	
第八章	低频电压测量的主要误差来源	(288)
第一节	概 述	(288)
第二节	常模与共模干扰及其抑制	(289)
一、常模(串模)干扰及其抑制	(289)	
二、共模(共态)干扰及其抑制	(296)	
第三节	负载效应	(301)

第四节 波形误差	(304)
一、有效值电压表的波形误差	(304)
二、平均值电压表的波形误差	(306)
三、峰值电压表的波形误差	(315)
第五节 传输误差	(317)
一、接线电压降	(317)
二、传输线效应	(319)
第六节 地电流影响与接地	(320)
一、信号频率的接地电流	(321)
二、交流供电电源频率的接地电流	(322)
第七节 电磁干扰及屏蔽	(323)
第八节 热电势与噪声影响	(324)
一、热电势的影响	(324)
二、噪声的影响	(325)
第九节 交流测量中的直流分量	(325)
参考文献	(327)
第九章 低频电压的量值传递	(329)
第一节 概 述	(329)
第二节 电压表的检定	(331)
一、基本误差的检定	(332)
二、频率附加误差的检定	(333)
第三节 标准电压源的检定	(335)
一、频率检定	(336)
二、直流输出电压的检定	(336)
三、交流输出电压的检定	(337)
四、非线性失真的检定	(337)
第四节 精密交流校准源的检定	(338)
一、伏特量程电压的检定	(339)
二、毫伏量程电压的检定	(341)
三、输出电压稳定度的检定	(344)

第五节 精密电压表的检定	(345)
一、精密电压表基本误差的检定	(346)
二、精密电压表频率附加误差的检定	(346)
第六节 热电转换器的检定	(347)
一、用高一级的电压标准直接测量	(348)
二、用已校准的热电转换器作间接测量	(349)
第七节 微电位计的检定方法	(349)
一、用交流电压标准检定微电位计	(351)
二、用标准微电位计检定工作微电位计	(352)
第八节 交直流转换标准的国际比对	(355)
一、国际电压比对简介	(355)
二、低频电压国际比对举例	(357)
第九节 低频电压的检定系统	(361)
一、我国低频电压的检定系统	(361)
二、苏联的电压检定系统	(362)
三、国外低频电压量值传递概况	(364)
参考文献	(365)

第一章 绪 论

第一节 电压测量的意义与特点

一、电压测量的意义

电压的测量是电子测量技术的一个基本而又重要的参量。各种类型的电压表已经成为实验室中必不可少的通用仪器，大多数电子技术参数的量值都与电压这个参数的测量有关，诸如阻抗、功率、衰减、失真度、噪声、驻波、 Q 值和频谱等参量都可以通过电压的直接或间接测量求得。这些参量计量的准确度与电压的精确测量有着密切的关系。在某种程度上，可以认为上述某些参量的定标准确度可归结为电压测量的准确程度。另一方面，电子电压表或电压测量系统几乎成为所有电子测量仪器的一个组成部分。例如，标准信号发生器、示波器、失真仪、 Q 表、频谱分析仪……等，常用仪器都具备电压测量部分，电压测量的准确度在这些仪器的技术指标中占有重要的地位。因此，本分册所讨论的电压计量与测试技术有关的问题，它们在逻辑上具有它的基础性，广泛性和独立性。

二、电压的定义

电压又称为电位差。电场中 a 、 b 两点的电位差等于单位正电荷在电场中从 a 点经过任意路径到达 b 点时电场力所

做的功。表达式为

$$U_b - U_a = - \int_a^b E \cos Q di \quad (1-1)$$

式中 E ——为电场强度，

Q ——为 E 与线积分单元之夹角。

a, b 两点的电位差亦称为 a, b 两点的电压，即

$$U_{ba} = - \int_a^b E \cos Q di \quad (1-2)$$

由定义可知，要使电压 U_{ba} 具有唯一性，即具有确定的值，必须使线积分仅与 a, b 两点位置有关，而与积分路径无关。与积分路径无关的条件是电场沿任意闭合回路的线积分为零，即

$$\oint E \cos Q di = 0$$

上式也是电压具有唯一性的条件。对于无旋电场此式成立，因此无旋电场的电压具有唯一性。在这种条件下，所定义的电压才有实际意义。

同轴线中的电磁波是横波（即 TEM 波），电力线从内导体到外导体，电场是无旋的，电压具有确定值。所以只有在 TEM 波的同轴系统中才能测量电压。由于波导系统中电压不具有唯一性，所以波导系统中电压测量没有实际的意义。

三、电压测量的基本要求

电子技术对电压测量的要求具有如下的几个特点：

(1) 频率范围宽

这是电子测量技术的一个独有的特点。目前电压测量的频率范围大约从 0.0001 Hz 到 1000 MHz 以上。根据被测对象的频率不同，在无线电计量领域内，划分为低频电压和高频电压两大类，至于低频和高频电压的频率分界至今无统一

的严格规定。习惯上若干 MHz 以下为低频电压讨论范围。

近年来由于 SMA 小型同轴系统的发展使电压测量的频率范围从几百兆赫开拓到几千兆赫。在如此宽广的频带上，由于各种因素的影响（如分布参数、传输效应、渡越时间……等），不可能采用同样的测量原理和方法，而且在不同频段的测量准确度也不一样。一般而言，低频电压的测量准确度较高，目前已可以达到 $\pm 0.01\% \sim \pm 0.1\%$ ；而高频电压测量准确度一般可达 $\pm 0.5\% \sim \pm 1\%$ 。因此，本分册主要讨论频率范围从几赫到 10 MHz 的低频电压测量的有关问题。更高频率电压测量的问题请参阅本丛书的第四分册《高频电压的计量测试》一书。

（2） 输入阻抗高

电压表的输入端存在并联的等效分路电阻和电容，为了使电压表接入被测电路时的影响尽可能地小，要求电压表的输入电阻应尽可能大，而输入电容应尽可能小，这是电压测量的一个基本要求。因为被测电路的阻抗较高，功率很少。如果所用的电压表的输入阻抗较小，将会严重地破坏被测电路的工作状态，以至引起很大的测量误差，甚至有时会等效于将它短路。电子电压表输入电阻一般较高，对直流测量可达几百兆欧以上，在低频时约为 $1 \sim 10 \text{ M}\Omega$ ，输入电容一般在 $10 \sim 100 \text{ pF}$ 左右。

（3） 电压量程宽

电压测量上限一般在 1 000 V 以下，电压测量下限一般为几个毫伏，甚至要求测到零点几微伏。随着科学技术的发展，已出现灵敏度高达 10^{-9} V 的数字电压表。

（4） 能够测量各种不同的波形

普通电子电压表对测量的波形是有选择的，一般只适用于失真不大的正弦波，对于测量非正弦电压将会产生较大误

差，或者要求乘上适当的修正因子。目前已能制造真有效值电压表，这种电压表不但能对正弦波响应，而且还能测量各种失真波形和非正弦波以至脉冲电压，并且可以分别测得这些波形的峰值，平均值和有效值电压。真有效值电压表通常用波高率这一指标衡量对非正弦波测量的适应程度，由于测量非正弦波给电压测量带来一些特殊问题，所以在测量时应引起足够的重视。

近代电子技术的发展，对电压测量不断地提出了如数字化、快速化、自动化和智能化等适应动态测量的新要求。

从以上所述的电压测量特点来纵观电子电压表的发展过程，大致可以分为以下几个阶段：在电子电压表出现以前，低频范围均使用静电式和热电式电压表，由于静电式电压表的指针偏转与被测电压的有效值成正比，所以电压表的读数与电压波形无关，并且对外界磁场不敏感。但它的缺点是输入电容较大，工作频率范围不高，而且灵敏度低，脆弱而价昂，这种仪表目前已很少应用，一般只用于高压的测量。热电式仪表也存在输入阻抗低，灵敏度低和容易烧毁等缺点而被淘汰。从1917年发明电子管电压表以来，电压测量仪表有着极大的发展，可以认为电子管电压表的出现是电压测量进展的里程碑。初期的电子管电压表受到了电子元件和电路技术的限制，当时采用的电子管检波-放大式原理，这种电压表可以用于较高的频率，但灵敏度低，一般只能测量几百毫伏以上的电压。而另一种型式的电压表采用放大-检波原理，其测量灵敏度可提高到毫伏级，但测量频带的上限却受到了限制，一般只能达到10 MHz。到60年代初期，由于半导体三极管的出现，开始应用调制放大器代替直流放大器，成功地解决了直流放大器增益和零点漂移的矛盾，从而使得检波-放大式电压表统一了宽频带与高灵敏度毫伏电压的测