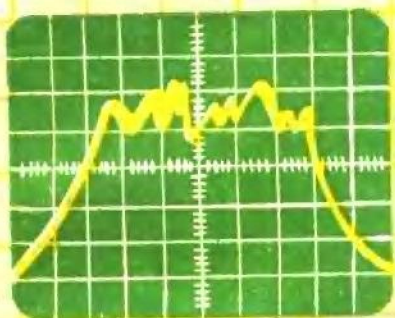


应用电子测量技术

ying yong



**DIANZI
CELIANG
JISHU**

黄绍勤 编著

湖北科学技术出版社

应用电子测量技术

黄绍勤 编著

湖北科学技术出版社出版 新华书店湖北发行所发行

湖北工学院印刷厂印刷

850×1168毫米 32开本 6.875印张 164,000字

1986年3月第1版 1986年3月第1次印刷

印数 1—3,000

统一书号: 15304·69 定价: 1.30元

前 言

电子测量技术的发展非常迅速，它与科研、实验、生产技术息息相关，内容繁多，应用极广。目前，在医学、物理、化学及其它工业部门中，许多参量的测量大多通过传感技术转变为电子测量技术中电压参量的测量。因此，本书在介绍电子测量技术的基本知识及测量误差分析的基础上，重点讲述了电压测量的主要特点和电压测量的各种基本原理，包括利用检波器、外差法、热偶、热电阻、模拟—数字变换、取样技术、脉冲保持电路等几乎所有测量电压的原理，以及电子示波器及其测量技术。

本书可作为大专院校电类专业的教材，也可供有关专业师生、工程技术人员、技术工人、电学爱好者学习参考。

本书在编写过程中得到了汤之璋教授、江庚和副教授的大力支持。江庚和副教授审阅了第一、二、三章，汤之璋教授审阅了第四章。华永和副教授对本书的初稿提出了不少的宝贵意见。罗玉兰同志为本书绘制了全部插图，在此一并表示感谢。

编者

1985年9月于华中工学院

目 录

第一章 绪 论

- § 1 电子测量的意义..... (1)
- § 2 电子测量的发展与应用..... (2)
- § 3 电子测量的基本任务..... (3)
- § 4 电子测量的特点..... (4)

第二章 测量学的基本知识及测量误差

- § 1 量具与仪器..... (6)
- § 2 基准与标准..... (7)
- § 3 误差的表示方法..... (9)
 - 3.1 绝对误差..... (9)
 - 3.2 相对误差..... (10)
- § 4 量具与仪器的容许误差..... (13)
- § 5 误差分类..... (14)
 - 5.1 系统误差..... (14)
 - 5.2 随机误差..... (15)
 - 5.3 差错..... (16)
- § 6 系统误差的消除..... (16)
 - 6.1 系统误差的来源..... (16)
 - 6.2 消除或减弱系统误差的典型测量技术..... (18)
 - 6.3 有效数字与消除系统误差的准则..... (24)
- § 7 随机误差的计算..... (26)
 - 7.1 随机误差的性质和特点..... (26)

7.2	对测量精确度进行估计时所用的尺度·····	(31)
7.3	测量结果的计算整理·····	(34)
§ 8	一次测量的误差的估计·····	(37)
8.1	用直读式仪器按直接法进行·····	(37)
8.2	用直接式仪器按间接法进行·····	(38)

第三章 电压测量

§ 1	电子技术中被测电压的主要特点及对测量仪器的基本要求·····	(40)
§ 2	在电子技术中测量电压应注意的几个问题·····	(41)
2.1	电压表的选择·····	(42)
2.2	电压表与被测电压源的连接·····	(44)
2.3	接地问题·····	(44)
§ 3	交流电压的表征及电压测量仪器的分类·····	(45)
§ 4	利用检波器测量交流电压的原理及应用举例·····	(53)
4.1	平均值检波器·····	(53)
4.2	峰值检波器·····	(63)
4.3	有效值检波器·····	(78)
4.4	检波器的波形误差·····	(81)
§ 5	利用外差法测量交流电压的原理·····	(90)
§ 6	利用热偶测量交流电压的原理·····	(92)
§ 7	利用测热电阻测量交流电压的原理·····	(93)
§ 8	利用模拟—数字变换测量直流电压的原理及其 数字式电压表·····	(97)
8.1	反馈比较型数字电压表·····	(97)
8.2	电压—时间变换型数字电压表·····	(106)
8.3	电压—频率变换型数字电压表·····	(115)

8.4	数字电压表的主要工作特性	(119)
8.5	数字电压表的发展方向	(124)
§ 9	利用取样技术测量高频电压	(125)
9.1	相关取样	(126)
9.2	随机取样	(127)
§ 10	脉冲电压的测量	(130)
10.1	利用普通峰值检波器测量脉冲电压	(130)
10.2	利用脉冲保持电路测量脉冲电压	(133)

第四章 电子示波器及测量技术

§ 1	电子示波器引论	(138)
1.1	电子示波器的功用	(138)
1.2	电子示波器的分类	(139)
1.3	电子射线示波管	(140)
1.4	示波器显示波形原理及其同步	(147)
1.5	示波器的方框图	(152)
§ 2	通用电子示波器	(155)
2.1	示波器的y通道	(155)
2.2	示波器的x通道	(169)
2.3	示波器整机电路举例——SR 8 型 二踪示波器	(182)
§ 3	电子示波器的测量技术	(199)
3.1	电子电路参数的测量	(199)
3.2	电子设备整机质量指标的测量	(205)
3.3	非电参量的测量	(205)

第一章 绪 论

§ 1 电子测量的意义

测量是人们对自然界的客观事物取得数量观念的一种认识过程，就是用实验的方法，将被测的量与所选用作为单位的同类量进行比较，从而确定它的大小。测量中所用的设备就是仪器。测量是人们认识自然和改造自然的重要手段。

测量对于人们日常生活、现代工业生产、科学研究工作都有紧密联系，不可分开，非常重要。

在我们日常生活中，常常离不开测量。如量布、称秤、确定时间，测温度等等，这些都是测量。

现代工业生产中，都是批量生产，需要零件具有互换性，同时还要解决有关产品质量，经济生产和废品防止等问题，没有普遍发达的测量技术是不能实现的。

科学研究工作中常常要对事物进行实验性的探讨，往往需要进行大量的或非常复杂的测量、统计、分析和归纳工作，没有适当的测量方法和测量仪器，现代科学研究工作是无法进行的。

电子测量，广义地说，凡是以电子技术作为手段，对一切物理量进行的测量均属于电子测量。狭义而言，电子测量的对象一般仅限于对各种电参量和电性能进行的测量。在电子科学技术领域中，很多物理量和物理现象是人体感官所无法直接感觉到的，只有在电子测量的基础上，才能对它们进行定量分析，从而找出

它们变化的客观规律。从某种意义上说，近代科学技术水平，是由电子测量的水平来保证和体现的，也是衡量一个国家科学技术水平的重要标志之一。

§ 2 电子测量的发展与应用

电子测量包括电子测量技术与测量仪器。它的发展是与自然科学特别是电子技术的发展同时诞生，并驾齐驱的。两者之间是互相依赖，互相促进，互相服务的关系。一方面，电子技术部门的发展和提高与精确可靠的测量方法及测量设备的研究有着紧密的联系，电子测量为电子技术的研究、实验、分析和检验提供了条件；另一方面，电子技术的发展向电子测量不断提出新课题，不断出现新的测试技术与新型仪器。同时，近代电子学、计算科学、物理学和材料学等的发展又反过来为电子测量提供了新理论、新技术、新工艺、新材料、新器件，形成了相辅相成不可分割的关系。

对于熟悉电子学发展史的人来说，可以从大量历史事实得出上述结论。例如：早在1897年，为了测定电子的电荷质量比值，当时为此目的而创造出电子示波器的核心部分——示波管，但直到二十世纪三十年代的末期，由于宽带放大器，高压整流，脉冲技术，电真空技术等掌握，才出现类似于今天实验室中常用的普通低指标的示波器。电子示波的出现，在电子测量发展中具有重大意义。它不仅加深了人们对许多电现象的理解，而且反过来又促进了电子技术的发展，并为以后的雷达、电视的发展奠定了基础。从四十年代以来，由于雷达、电视技术发展的需要，以及新型器件的不断完善，促使电子示波器大踏步向前发展达到了现代宽频程、宽量程的高指标、多用途各种类型的电子示波器的水平。又如：近年来，电子计算技术发展十分迅速，出现了微型计

算机与电子测量仪器相结合的新仪器及测试系统,可以自动进行测量,自动记录,自动完成数据的运算、分析和处理,使电子仪器成为“智能”仪器。这就更便于组成一系列自动化系统。

由于电子测量具有高灵敏度、高精度的优越性,所以可用于快速测量、自动测试以及遥控、遥测等。现在已经很难指出哪一个科学技术部门中没有应用到电子测量。例如:物理学中放射性测量,医学中的脑电波和心电波的测量,以及时间—频率标准的确定,食品工业中的包装温度计,燃料工业中的石油产品的连续测定仪,地质学中的探矿的电测法,纺织工业中织物漂白度的鉴定仪,动力工业中锅炉内水垢厚度测定仪等等。此外,人造宇宙火箭中轨道的控制及其所探索到天体物理量的遥测等等更是明显的辉煌成就。

总之,由于电子测量的广泛应用和它与自然科学的密切关系,电子测量的发展始终和自然科学的最新发展相联系,电子测量技术的最新水平往往是科学技术最新成果的反映。

§ 3 电子测量的基本任务

电子测量的内容非常丰富。这里仅限于电子电路中所遇到的主要电参量进行测量,大体来说可把它分成以下几个方面。

1. 关于电能的量:包括电流(I),电压(U),功率(P),电场强度(E)等。相应的仪器有电流测量仪,电压测量仪,功率测量仪及场强计等。

2. 关于电路参数的量:包括电阻(R),电感(L),电容(C),阻抗(Z),品质因素(Q)等。相应的仪器有各种测量(R)、(L)、(C)等元件参数仪器, Q 表等。

3. 关于信号波形特征的量:包括频率(f),周期(T),相位(φ),失真度($r\%$),调幅度($M\%$),调频指数

(m)，脉冲参量等。相应的仪器有频率及波长测量仪，相位测量仪，各种电子示波器，频谱仪，谐波分析仪，调幅度计，频偏仪，失真度仪等。

4. 关于电子设备性能的量：包括放大量(K)，衰减量(A)，灵敏度(S)，通频带(Δf)等。这些量可用相应的仪器进行组合测量，如：电压表与各种讯号发生器等组合。也有用专用仪器进行测量，如：一定频率范围的通频带可用扫频仪进行测量。

§ 4 电子测量的特点

电子测量与其它测量相比，具有如下主要特点：

1. 测量频率范围极宽。低端可测 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Hz或更低，高端可至 10^{12} Hz或更高。在不同的频段上，同一量（例如阻抗）所依据的测量原理、方法以及使用元器件所购成的仪器，都可能不同。当被测对象工作频率范围很宽时，往往要几种在不同频段工作的仪器来进行衔接。近年来研制了很多宽频率设备，使一台仪器能在很宽的频率范围内工作。

2. 量程很广。所测的量，其大小相差极其悬殊。普通的欧姆表可以测出大约几 Ω 至几十M Ω 的电阻，量程达六个量级，即量程是1:1000000；一台晶体管电压表可以测出数百 μ V至几KV电压，量程为七个量级；一台数字式频率计，其量程更宽，可达十七个数量级。

3. 精确度很高。一般最低的要求，误差在百分之几。最高要求，误差可到 10^{-13} 以下，频率测量目前是在一切电和非电测量中精确度最高的。测量一个量，要求精确度不同所采用的测量技术和仪器往往也不一样。

除此以外，由于电子测量中一般都使用电子设备，测量

往往具有速度快，可以遥测，易于实现测量过程自动化等优点。特别是近年来测量手段和电子计算技术相结合的结果，使这些优点尤为显著。

第二章 测量学的基本知识 及测量误差

§ 1 量具与仪器

测量是一个过程，即将待测量与一个同类的已知物理量相比较，把已知量作计算单位，确定它是该单位的若干倍，或是若干分之一。换句话说，测量就是求出被测的量与计算单位的比值。测量结果是个有名数，也就是包括数字和单位名称两部分。

具体体现计量单位的物体就是量具。例如尺就是长度单位的量具。只有少数量具如尺子、量杯等，直接就可以参与比较。然而大多数量具在参与比较时，都需要借助于专门的比较设备才能完成。这些比较设备称为比较仪。例如，用砝码来测量物体的重量时，需要借助于天平；用标准电阻来测量一个未知电阻时，需要借助于电桥等。这里砝码与标准电阻是量具，而天平与电桥称为比较仪。

大多数量具都要配以相应的比较仪才能进行测量，其操作较为麻烦。有的量具结构比较脆弱或对使用条件要求比较苛刻，而且大多数量具的测量范围不宽。此外，还有不少参量（如速度、效率、功率、高频电压、非线性失真等）无法作成实物量具。因此，在实际工程测量中，很少使用量具，而是广泛地使用各种直读式仪器，这类仪器可以通过其读数机构直接得到测量结果。日常工作中使用的三用表、失真度测量仪、电子示波器、数字式

频率计等，都属于直读式仪器。直读式仪器测量速度快，使用起来也比较简便。但是，由于它在生产出厂前要对读数装置进行定标，再加上其零部件（尤其是各种可调零部件）较多，造成读数不稳因素也较多，故直读式仪器一般不如量具测量的精度高。

比较仪和直读式仪器都属于测量仪器。测量仪器是泛指一切参与测量工作的设备。它包括各种直读及非直读的仪器，供比较用的设备（如电桥），供测量工作提供各种信号源的设备以及完成其他辅助任务的设备（如放大、滤波、频率变换、记录、运算等）。

在电子学中使用的各种信号发生器、电压表、频率计、Q表、示波器、网络分析仪、失真度测量仪等都是测量仪器。由于这些仪器都是运用电子学技术，并以各种电子元件、器件、部件为核心组成的仪器，故又称为电子测量仪器。

§ 2 基准与标准

在生产、科研、日常工作中，使用大量的不同精度，不同类型的量具和仪器。对同一物理量来说，保证各类量具或仪器所体现的量值互相统一是十分重要的。为此，国家设有各种基本物理量计量的国家基准与标准。有关基准和标准的建立和标准量的传递工作，称为计量。计量技术一般属于精确的测量技术的特殊运用。计量学是研究如何保证量值的统一和准确所必须的方法、技术、政策以及专门设备的科学。

所谓基准，是指用当代最先进的科学技术及工艺水平，以最高的精确度和稳定性建立起来的，专门用来规定，保持和复现某种物理计量单位的特殊量具或仪器。

一般将基准划为三级：一级基准、二级基准、三级基准。

一级基准为主基准，又称原始基准或原器。是指一个国家直

接按物理量单位的定义复制的具有最高水平的基准。经过严格的法定手续，主基准可用来充当国家基准。

二级基准为各种用途的副基准或称次基准。它的量值根据主基准来确定，平时用来代替主基准向下传递量值，这样可保证国家基准不致因经常使用及搬动而降低精度。通常设有若干副基准以完成各种不同的工作。在副基准中设置了作证基准、参考基准、中介基准。

作证基准，它是用来检验国家基准的完善性，并在国家基准一旦损坏或失效时代替国家基准的一种副基准（通常为几个）。通过定期的国际比对，可以判明国家基准与作证基准之间的量值变化情况，并能对其系统偏差进行修正以便恢复其原有之值。

参考基准，这是进行量值传递的一种副基准。为了使用方便及对组成基准的不同方案进行比较，其原理、结构、外形往往与国家基准不同。例如，电阻的主基准是一根具有一定形状，灌有水银的玻璃管，而副基准则是一组密封的锰铜电阻线圈。

中介基准，由于某些基准互相难以进行直接比对，故需要专门的基准作中介。例如，国家伏特基准与国际伏特基准进行比对时，是通过标准电池来实现的，此即中介基准。

三级基准为各种工作基准，用来直接向下属标准量具或仪器进行量值传递。为了保证最高的精度和稳定性，基准器的工艺、结构往往都十分精细，对环境要求也很严格，一般操作复杂，价格较贵，不宜经常运用。于是，便根据基准器复现的量值制成了各种不同等级。便于使用的标准量具及仪器，简称标准。这是一类有限精度的计量标准，按精度高低又分为一级标准、二级标准和三级标准。物理量的量值便通过基准和各级标准向日常工作仪器进行传递。

各种类别、等级的基准、标准以及工作量具及仪器，必须按规定的检定周期、检定规程交上级计量部门进行检定并发给合格

证书。没有检定合格证书或证书有效期已超过者，其原有说明或检定记录上所标明的精度指标不再可信而只能作为参考，用这样的标准进行产品检验被认为是不合法的。

§ 3 误差的表示方法

任何测量，由于各种因素的影响，测量结果总不可能准确地等于被测量的真值，因此误差总是存在。误差按表示方法可分绝对误差和相对误差。

3.1 绝对误差

令被测量的真值为 A_0 ，仪器的示值或量具的标称值为 x ，于是绝对误差为：

$$\Delta x = x - A_0 \quad (2-3.1)$$

式(2-3.1)只有理论上的意义，因为一般真值是难以掌握的。于是，在实际测量中，是把测量仪器或量具通过与上一级标准相比较，得出其实测值 A 来代替真值 A_0 。但由于上级标准（甚至是基准）也有误差，因此 A 并不等于 A_0 。不过，一般地说 A 总比 x 更接近于 A_0 。

x 与 A 之差称仪器的示值误差或量具的标称误差（或实际误差），记为：

$$\Delta x = x - A \quad (2-3.2)$$

式(2-3.1)与(2-3.2)都是以代数差的形式给出误差的绝对值大小及其符号。由于习惯，一般又称为绝对误差以别于后面将要介绍的相对误差。

定义与 Δx 大小相等、符号相反的值，称为修正值，一般用 C 表示：

$$C = -\Delta x = A - x \quad (2-3.3)$$

通过检定，可以由上一级标准（或基准）给出受检仪器的修

正值。利用修正值便可求出该仪器的实际值：

$$A = x + C \quad (2-3.4)$$

例如，用某一安培计测量某个电流，安培计给出示值为2.5A。同一电流，用标准安培计来测量，得到实际值2.525A。于是这个安培计的示值误差为：

$$\Delta x = x - A = 2.5 - 2.525 = -0.025A$$

安培计修正值为：

$$C = -\Delta x = +0.025A$$

该电流的实际值为：

$$A = x + C = 2.5 + 0.025 = 2.525A$$

这里应该指出仪器的读数这一概念，它常常会 and 仪器的示值这一概念相混淆。从仪器的度盘或显示装置上直接读出的数字，称为读数。读数有时就是仪器的示值。但往往读数不是仪器的示值，而是要根据读数，经过简单计算、查表、查曲线才能得出示值。

3.2 相对误差

为了说明测量精确度的高低，经常采用相对误差的形式，常用的有下列几种：

1. 实际相对误差

实际相对误差，用绝对误差 Δx 与被测量的实际值A的百分比值来表示的相对误差：

$$\Gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (2-3.5)$$

2. 示值相对误差

示值相对误差，用绝对误差 Δx 与仪器的示值x的百分比值来表示的相对误差：

$$\Gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (2-3.6)$$

当 r_A 与 r_x 之值不大时， A 与 x 很接近，故一般两者相差很小。如果误差本身较大，就需要注意二者的区别了。一般来说用 r_x 较为适宜，这是因为在仪器某些指定点上进行检定时，误差范围是相对于该检定点的示值而言的。

3. 满度相对误差

满度相对误差，用绝对误差 Δx 与仪器的满度值 x_m （量程上限）之比来表示：

$$r_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (2-3.7)$$

电工仪表是按 r_m 之值来分级的，我国电工仪表共分七级：0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5及5.0、这分别表示各级仪表的满度相对误差 $r_m \leq \pm 0.1$ 、 $\leq \pm 0.2$ 、 $\leq \pm 0.5$ 、 $\leq \pm 1.0$ 、 $\leq \pm 1.5$ 、 $\leq \pm 2.5$ 及 $\leq \pm 5.0$ 。仪表面板上标有级别。如果该表同时有几个量程，则所有量程均有同级别的 r_m 。

由于 r_m 是用绝对误差 Δx 与一个常数 x_m （量程上限）之比来表示的，故实际上标出的是绝对误差大小。如果仪表的级别 S 已定，也就是 r_m 已知，在同一量程内（满度值为 x_m ），绝对误差基本上为常数：

$$\Delta x = x_m \cdot S\% \quad (2-3.8)$$

测量示值相对误差：

$$r_x = \frac{x_m \cdot S\%}{x} \quad (2-3.9)$$

由式（2-3.8）可见，当一个仪表级别 S 选定后，测量中绝对误差的最大值与仪表刻度上限 x_m 成正比。因此所选仪表满度值 x_m 不应比仪器的示值大得太多。同样，在式（2-3.9）中，总是满足 $x \leq x_m$ 。可见当仪表级别 S 选定后， x 越接近 x_m 时，测量中相对误差的最大值越小，测量越准确。因此，为了减少测量中的示值误差，在选择量程时使指针尽可能接近于满度值 x_m 。一般