

内 容 提 要

本书比较系统地阐述了电子测量的原理与方法以及近代电子测量仪器的原理与应用。内容包括：利用屏幕显示技术实现的测量（波形测试技术，扫频与图示技术，模拟信号的频谱分析，数字系统逻辑量的测试）；电子电路中参数的测量（电压量、频率时间相位量的数字测量技术，非电量测量及常用传感器的应用）；误差分析与数据处理；微处理器及微型计算机在电子测量中的应用。书末还附有习题及答案。

本书在选材上具有一定的先进性、系统性和实用性。可供大专院校有关专业师生使用，也可供从事电子技术工作的科技人员自学和参考。

高等学校试用教材

电 子 测 量 技 术

清华大学自动化系 张乃国 编著
童诗白 审

责任编辑：高丕武

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本：787×1092 1/16 1985年6月第一版
印张：19 12/16 页数：158 1985年6月北京第一次印刷
字数：494 千字 印数：1—15,000 册

统一书号：15045·总 3038—教 702

定价：3.25元

目 录

第一章 概述	1
1.1 电子测量的意义	1
1.2 计量的基本概念	4
1.3 误差的基本概念	5
1.4 测量方法	13
1.5 电子测量仪器概述	16
第二章 波形测试技术	18
2.1 示波器显示波形的原理	18
2.2 电子示波器的组成与种类	27
2.3 宽频带示波器的原理	30
2.4 多波形显示	60
2.5 双扫描显示	69
2.6 缓慢变化信号的观测	74
2.7 高频与快速脉冲信号的观测	76
2.8 波形的记忆	78
2.9 示波器的校验	82
2.10 示波器的选择与使用	86
第三章 扫频与图示技术	90
3.1 频率特性的测量方法	90
3.2 低频扫频仪的工作原理	92
3.3 光栅图示法	98
3.4 器件特性曲线的图示方法	100
3.5 光笔图形显示	109
第四章 模拟信号的分析	111
4.1 非线性失真的测量	111
4.2 信号的频谱分析方法	114
4.3 频谱分析仪的原理与应用	117
第五章 数字系统中逻辑量的测试	123
5.1 数字电路测试的特点	123
5.2 逻辑电路的简易测试	126
5.3 逻辑分析仪的原理	130
5.4 逻辑分析仪的应用	136
第六章 电子电路中电压量的测量	139
6.1 电子电路中电压量的特点	139
6.2 高内阻回路直流电压的测量	140

6.3	模拟式交流电压表的类型 ..	145
6.4	低频电压的测量 ..	148
6.5	高频电压的测量 ..	155
6.6	脉冲电压的测量 ..	158
6.7	噪声电压的测量 ..	164
6.8	电压测量的数字化方法 ..	165
6.9	三斜积分型数字电压表的原理 ..	185
6.10	数字电压表的工作特性与测量误差 ..	189
第七章	频率时间与相位的测量 ..	194
7.1	时频的标准 ..	194
7.2	频率的测量 ..	196
7.3	时间的测量 ..	200
7.4	相位的测量 ..	208
第八章	非电量的测量 ..	212
8.1	常用的传感器 ..	212
8.2	传感器在电子测量中的应用 ..	220
第九章	误差分析与数据处理 ..	224
9.1	测量误差的分类与测量结果的评定 ..	224
9.2	随机误差的统计特性及估算方法 ..	228
9.3	系统误差的特征及其减小的方法 ..	237
9.4	疏失误差及其判断准则 ..	243
9.5	测量数据的处理 ..	247
9.6	误差的合成与分配 ..	255
9.7	最佳测量条件的确定与测量方案的设计 ..	264
第十章	微处理器与微型计算机在电子测量中的应用 ..	269
10.1	用 CPU 与 D/A 接口构成函数发生器 ..	269
10.2	用微处理器构成数字电压表 ..	271
10.3	用微型计算机测量任意波形电压 ..	276
10.4	用微处理机构成的数字存储示波器 ..	277
10.5	用微型计算机处理测量数据 ..	290
10.6	电子测量自动化 ..	295
附录一	习题 ..	297
附录二	习题答案 ..	304
附录三	本课学时分配方案 ..	306
附录四	参考文献 ..	307

6.3	模拟式交流电压表的类型 ..	145
6.4	低频电压的测量 ..	148
6.5	高频电压的测量 ..	155
6.6	脉冲电压的测量 ..	158
6.7	噪声电压的测量 ..	164
6.8	电压测量的数字化方法 ..	165
6.9	三斜积分型数字电压表的原理 ..	185
6.10	数字电压表的工作特性与测量误差 ..	189
第七章	频率时间与相位的测量 ..	194
7.1	时频的标准 ..	194
7.2	频率的测量 ..	196
7.3	时间的测量 ..	200
7.4	相位的测量 ..	208
第八章	非电量的测量 ..	212
8.1	常用的传感器 ..	212
8.2	传感器在电子测量中的应用 ..	220
第九章	误差分析与数据处理 ..	224
9.1	测量误差的分类与测量结果的评定 ..	224
9.2	随机误差的统计特性及估算方法 ..	228
9.3	系统误差的特征及其减小的方法 ..	237
9.4	疏失误差及其判断准则 ..	243
9.5	测量数据的处理 ..	247
9.6	误差的合成与分配 ..	255
9.7	最佳测量条件的确定与测量方案的设计 ..	264
第十章	微处理器与微型计算机在电子测量中的应用 ..	269
10.1	用 CPU 与 D/A 接口构成函数发生器 ..	269
10.2	用微处理器构成数字电压表 ..	271
10.3	用微型计算机测量任意波形电压 ..	276
10.4	用微处理机构成的数字存储示波器 ..	277
10.5	用微型计算机处理测量数据 ..	290
10.6	电子测量自动化 ..	295
附录一	习题 ..	297
附录二	习题答案 ..	304
附录三	本课学时分配方案 ..	306
附录四	参考文献 ..	307

第一章 概 述

测量是人类对客观事物取得数量概念的认识过程,是人们认识和改造自然的一种不可缺少的手段。在自然界中,对于任何被研究的对象,若要定量地进行评价,必须通过测量来实现。在电子技术领域中,中肯的分析只能来自正确的测量。

英国科学家 A. H. 库克 (Cook) 说*: “测量是技术生命的神经系统。我们通过测量认识周围的物质世界,通过测量把这些知识变成数字语言,然后用数学方法把它整理成合乎逻辑的系统;通过测量,可使这种系统性知识借助于工程技术用来改造物质;世界精密的测量是精确的知识和经济的设计所必需;方便的测量是敏捷的通讯和有效的组织所必需。”

测量技术主要研究测量原理、方法和仪器等方面内容。凡是利用电子技术进行的测量都可以称为电子测量。如今电子测量已经成为一门发展迅速、应用广泛、精确度愈来愈高、对现代科学技术发展起着巨大推动作用的独立学科。

1.1 电子测量的意义

一、测量的概念

测量的定义是,为确定被测对象的量值**而进行的实验过程。

通常,测量结果的量值由两部分组成:数值(大小及符号)和相应的单位名称。当然测量的结果也可以用曲线或图形等方式表示出来,但它们同样包含着具体的数值与单位。没有单位,量值是没有物理意义的。

在测量过程中,不可避免地存在着误差。把结果与误差同时标注出来,以说明测量结果可信赖的程度。

一般地说,测量是一种比较过程,把被测的量与同种类的作为单位的量,通过一定的测量方法进行比较,以确定被测量是该单位的若干倍。

设被测量为 x , 其测量结果的数值为 a_x , 计量单位为 a_0 , 则

$$x = a_x \cdot a_0 \quad (1.1.1)$$

此式可理解为被测量 x 等于 a_x 个单位(a_0), 反映被测量与它的单位相比较的情况。

被测量的数值与所选定的计量单位大小有关。例如, $x = 100 \text{ mV}$, 当用“V”作单位时, $x = 0.1 \text{ V}$ 。若这两种数值分别用 a_{x1} 、 a_{x2} 表示, 单位用 a_{01} 、 a_{02} 表示, 则

$$x = a_{x1} \cdot a_{01} = a_{x2} \cdot a_{02}$$

或

$$\left. \begin{aligned} \frac{a_{x2}}{a_{x1}} &= \frac{a_{01}}{a_{02}} = K \\ a_{x2} &= K a_{x1} \end{aligned} \right\} \quad (1.1.2)$$

即

* 引自(英)P. 维古鲁:《电磁学单位和标准》,科学出版社,1979年。

** 量值包括量的数值(纯数部分)和计量单位。

式中 K 称为单位换算系数。可见,被测量的数值与所选单位的大小成反比。由于科学技术的发展,单位的种类繁多,所以表示测量结果时应重视单位的选择和统一。

物理量的单位必须以严格的科学理论为依据来加以定义。同一物理量所表示的单位必须与定义的单位相一致。

二、电子测量的内容

随着电子技术的不断发展,测量的内容愈来愈多。对于电参数的测量,分为电磁测量与电子测量两类,前者着重研究交直流电量的指示测量法与比较测量法,以及磁量的测量方法等。后者是以电子技术理论为依据、以电子测量仪器和设备为手段、以电量和非电量为测量对象的测量过程。

电子测量的内容包括:

1. 电能量的测量(各种频率、波形的电压、电流等);
2. 电信号特性的测量(波形、频率、时间、相位、噪声以及逻辑状态等);
3. 电路参数的测量(阻抗、品质因数、电子器件参数等);
4. 导出量的测量(增益、失真度、调幅度等);
5. 特性曲线的显示(幅频特性及器件特性等)。

随着电子技术的发展,人们力图通过传感器将许多非电量转换成电信号,再利用电子技术进行测量。例如天文观测、宇宙航行、地震预报、矿物探测及生产过程检测中的温度、压力、流量、液面、速度、位移,以及成分分析等,都可以转换成电信号进行测量。

电子测量除了对电参数进行稳态测量以外,还可以对自动控制系统的过渡过程及频率特性等进行动态测量。例如对一个轧钢的电气传动系统通过模拟计算机可以自动描绘出动态过程曲线;对于化工系统的生产过程进行自动检测与分析等等。

当然,其它科学技术领域的发展也对电子测量技术起着巨大的推动作用。例如半导体技术、计算技术、近代物理学等,均为电子测量的发展提供了新理论、新材料、新器件、新技术。同时由微型计算机等组成的自动化、智能化仪器不断涌现。各学科和领域这种相辅相成、互相促进的局面表明,掌握电子测量技术是对理工科大学生及科技人员提出的一个基本要求。

三、电子测量的特点

与其它测量相比,电子测量具有以下几个明显的特点:

1. 频率范围宽

除测量直流电量外,还可以测量交流电量,其频率范围低至 10^{-4}Hz ,高至数 THz ($1\text{THz}=10^{12}\text{Hz}$,读作太[拉]赫)。电子测量设备能够工作在这样宽的频率范围,使它的应用范围大为扩展。如果利用各种传感器,几乎可以测量全部电磁频谱的物理量。当然对于不同频段的测量需采用不同的测量方法与测量仪器。

2. 量程范围广

量程是测量范围上限值与下限值之差。由于被测量的大小相差很大,因而要求测量仪器具有足够的量程。对一台电子仪器,其量程上限与下限往往要相差几个甚至十几个数量级。例如一台数字电压表,要求测出从纳伏(nV)级至千伏级的电压;用于测量频率的电子计数式频率计的量程,上下限相差近17个数量级。量程范围广正是电子测量的突出优点。

3. 测量准确度高*

电子测量的准确度比其它测量方法高得多。例如,长度测量的准确度最高为 10^{-8} 。而用电子测量方法对频率和时间进行的测量,由于采用原子频标和原子秒作为基准,可以使测量准确度达到 10^{-13} 的量级,这是目前人类在测量准确度方面达到的最高指标。电子测量的准确度高,正是它在现代科学技术领域得到广泛应用的重要原因之一。由于目前频率测量的准确度最高,所以人们往往尽可能地把其它参数变换成频率信号再进行测量。

4. 测量速度快

由于电子测量是通过电子技术实现的。因而测量速度很快。这也是电子测量在现代科学技术领域内得到广泛应用的一个重要原因。例如,洲际导弹的发射和运行过程中就需要快速测出它的工作参数,通过电子计算机运算,再对它的运行发出控制信号,以使它达到预期的目标,这个过程如果测量速度较慢,就不能进行及时调整,自动控制就会失去作用。

同样道理,工业自动控制系统中,在生产线上进行“在线测量”,及时对机械运转状态或物质成分的比例进行调节,对于提高生产效率和产品质量都具有重大意义。在某些场合,要求对测量结果迅速进行数据处理,再发出控制信号。这样,对测量速度就提出了更高的要求。

在有些测量过程中,希望对同一量在相同条件下进行多次测量,再用求平均值的方法以减小误差。但是测量条件容易随时间变化,这时可以采用提高测量速度的方法,在短时间内完成多次测量,从而提高精密度**。

5. 易于实现遥测和测量过程的自动化

对于人体不便于接触或无法达到的区域,例如深海、地下、高温炉、核反应堆内等,可以将传感器埋入或通过电磁波、光、辐射等方式进行测量,这就是一般所说的遥测。

电子测量同电子计算机相结合。使测量仪器智能化,并在自动化系统中占居重要的地位。尤其是大规模集成电路和微处理器的应用,使电子测量呈现了崭新的局面。例如,自动转换量程,自动调节,自动校准,自动记录,自动地进行数据处理,自动修复等。

电子测量技术的新水平往往是科学技术最新成果的反映。因此,一个国家电子测量技术水平,往往可以标志这个国家科学技术的水平。这就使电子测量技术引人注目地在迅速发展。

* 准确度,表示测量结果中的系统误差大小的程度(详见后述)。

** 精密度(有的文献称精度,本书不用精度一词),表示测量结果中随机误差大小的程度(详见后述)。

1.2 计量的基本概念

一、计量学研究的内容

计量学是研究测量、保证测量统一和准确的科学。计量学研究计量单位及其基准，标准的建立、保存和使用；测量方法和计量器具；测量的准确度以及计量法制和管理等。计量学也包括研究物理常数，标准物质及材料特性的准确测定等。

计量是国民经济的一项重要的技术基础。计量工作在国民经济建设中占有十分重要的地位，对于改善企业管理、提高产品质量、节约能源，为实现标准化、自动化提供科学数据等方面都起着重要的作用。同样道理，计量科学技术的水平一般也可以标志着一个国家科学技术发展的水平。

计量工作对电子产品的质量管理尤为重要。产品出厂前要经过严格的计量检定，仪器仪表在使用过程中要定期进行检验和校准，以确保测量的准确性。

计量与测量不同，但二者又有密切的联系。测量是用已知的标准单位量与同类物质进行比较以获得该物质数量的过程，这时认为被测量的真实数值是客观存在，其误差是由测量仪器和测量方法等引起。而计量，则认为使用的仪器是标准的，误差是由受检仪器引起的，它的任务是确定测量结果的可靠性。计量学把测量技术和测量理论加以完善和发展，对测量起着推动作用。例如，原子频率基准具有极高的精确度*，因而使频率测量的精确度随之大为提高。反之，随着测量技术的发展，也不断出现各种新的计量仪器，推动计量学的发展。

二、计量器具

凡能用以直接或间接测出被测对象量值的量具、计量仪器（仪表）和计量装置统称为**计量器具**，也包括计量基准和计量标准。

1. 计量基准

(1) 国家基准(主基准)

它是用来复现和保存计量单位，具有现代科学技术所能达到的最高精确度的计量器具，经国家鉴定并批准，作为统一全国计量单位量值的最高依据。

(2) 副基准

通过直接或间接与国家基准比对**来确定其量值并经国家鉴定批准的计量器具。它在全国作为复现计量单位的地位仅次于国家基准。

(3) 工作基准

经与国家基准或副基准校准***或比对，并经国家鉴定，实际用以检定****计量标准的计

* 精确度，表示系统误差和随机误差综合的影响(详见后述)。

** 比对，指在规定条件下对相同精确度等级的同类基准、标准或工作用计量器具之间的量值进行比较。

*** 校准，是确定计量器具示值误差(或其它计量性能)的全部工作。

**** 检定，是为评定计量器具的计量性能(精确度、稳定度、灵敏度等)并确定其是否合格所进行的全部工作。

量器具。它在全国作为复现计量单位的地位仅在国家基准及副基准之下。设立工作基准的目的是不使国家基准由于使用频繁而丧失其应有的精确度或遭到损坏。

计量标准是按国家规定的精确度等级，作为检定依据用的计量器具或物质。

2. 量具

以固定形式复现量值的计量器具称为量具。量具可用或不用其它计量器具而进行测量工作，而且一般没有指示器，在测量过程中也没有运动的测量元件。量具分为单值量具（例如砝码、标准电池、固定电容器等）、多值量具和成套量具。

应当指出，量具本身的数值并不一定刚好等于一个计量单位，例如标准电池复现的是1.0186伏，而不是1伏。

上述这些有关计量学方面的基本知识，对于从事电子测量技术的工作者应当了解，并应正确使用这些术语。

三、单位制

单位的确定和统一是非常重要的。必须采用公认的而且是固定不变的单位。只有这样，测量才有意义。

计量单位是有明确定义和名称并命其数值为1的一个固定的量。例如1米，1秒等。

单位制是经过国际或国家计量部门以法律形式规定的。在国际单位制（代号SI）中包括了整个自然科学的各种物理量的单位，经1960年第11届国际计量大会（CGPM）通过并经1971年第14届CGPM修订，有七个基本单位。我国于1984年3月4日公布了《中华人民共和国法定计量单位》*。

1.3 误差的基本概念

一、研究误差的目的

一个量在被观测时，其本身所具有的真实大小，称为该量的**真值**。它是个理想的概念，一般地说，真值是得不到的，然而可以说保存在国际（国家）的基准，按定义规定在特定条件下的值可以认为是真值。

任何测量仪器的**测得值****都不可能完全准确地等于被测量的真值。

由于在测量过程中，由于人们对于客观认识的局限性，测量工具不准确、测量手段不完善、受环境影响或测量工作中的疏忽等原因，都会使测量结果与被测量的真值不同，这个差异称为**测量误差**。随着科学技术的发展，对于测量精确度的要求越来越高，要尽量控制和

* 见1984年3月4日《人民日报》。

** 测得值，是从仪器或量具直接反映或经过必要计算而得出的量值。当用仪器测量时，即仪器的指示值（简称示值）；当用量具测量时，即量具的标称值（在量具上标注的量值）。这里所说的示值，应与仪器仪表的读数区别开，**读数**是仪器刻度盘、显示器上直接读到的数字。例如，以100分度表示50mA的电流表，当指针指在50处时，读数是50，而示值为25mA。有时为了避免差错和便于查对，在记录测量的示值时应同时记下读数。

减小测量误差,使测量值接近真值。所以测量工作的价值取决于测量的精确程度。当测量误差超过一定限度时,由测量工作和测量结果所做出的结论或发现将是没有意义的,甚至会给工作带来危害。因此对测量误差的控制就成为衡量测量技术水平乃至科学技术水平的一个重要的方面。但是,由于误差存在的必然性与普遍性,因而人们只能将它控制到尽量低的限度,而不能完全消除它。重要的是要知道实际测量的精确程度和产生误差的原因。研究误差的目的,归纳起来可有如下几个方面:

1. 正确认识误差的性质和来源,以减小测量误差。
2. 正确处理测量数据,以得到接近真值的结果。
3. 合理地制订测量方案,组织科学实验,正确地选择测量方法和测量仪器,以便在条件容许的情况下得到理想的测量结果。

可见,正确认识与处理测量误差是十分重要的。

测量误差按表示方法来分,有绝对误差和相对误差;当用于表示测量仪器时还有“引用误差”。

按误差的来源分,有器具误差、人身误差、影响误差以及方法误差等。

按误差的性质分,有系统误差、随机(偶然)误差和疏失(粗大)误差。

这里先就误差的表示方法作一叙述,而误差来源及性质等内容将在第九章进一步讨论。

二、测量误差的表示方法

1. 绝对误差

(1) 定义:由测量所得到的被测量值 x 与其真值 A_0 的差,称为**绝对误差**。

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1.3.1)$$

当 $x > A_0$ 时, Δx 是正值; $x < A_0$ 时, Δx 是负值。所以 Δx 是具有大小、正负和量纲的数值。它的大小和符号分别表示测得值偏离真值的程度和方向。

【例1】一个被测电压,其真值 V_0 为100伏,用一只电压表测量,其指示值 V_x 为101伏,则绝对误差:

$$\Delta V = V_x - V_0 = 101 - 100 = +1(\text{V})$$

这是正误差,表示以真值为参考基准,测得值大了1伏。

式(1.3.1)中的 A_0 表示真值,对于测量者来说,是测不出来的,只能尽量接近。

计量学上的真值不能得到,可以用高一级或数级的标准仪器或计量器具所测得的数值代替真值。为了区别起见,称满足规定准确度的用来代替真值使用的量值为**实际值**,用 A 表示。这时的绝对误差写成

$$\Delta x = x - A \quad (1.3.2)^*$$

这是通常使用的表达式。

(2) 修正值(校正值)

与绝对误差的绝对值大小相等,但符号相反的量值称为**修正值**,用 C 表示

* 参考国际电工委员会359号公报,我国原第四机械工业部颁布的标准ST 943—75中规定:对于供给量仪器(信号源、稳压电源等),绝对误差的定义与此式恰好相反,即 $\Delta x = A - x$,是从给出量仪器角度来说的。这里是从测量者角度而言,所以采用式(1.3.2)定义。

$$C = -\Delta x = A - x \quad (1.3.3)$$

通过检定（校准）由上一级标准（或基准）以表格、曲线或公式的形式给出受检仪器的修正值。

在测量时，利用测得值与已知的修正值相加，即可算出被测量的实际值。

$$A = x + C \quad (1.3.4)$$

【例2】一台晶体管毫伏表的10mV档，当用其进行测量时，示值为8mV，在检定时8mV刻度处的修正值是（-0.03）mV，则被测电压的实际值为

$$V = 8 + (-0.03) = 7.97(\text{mV})$$

这说明含有误差的测得值加上修正值后就可以减小误差影响，这是经常采用的一种方法。测量仪器应当定期送计量部门进行检定，其主要目的就是获得准确的修正值，以保证量值传递的准确性。同理，利用修正值，应在仪器的检定有效期内，否则要重新检定。必须指出，修正值本身也有误差，修正后的数据只是比较接近实际值而已。

对于自动化程度较高的测量仪器，可以将修正值编成程序储存在仪器中。在测量时，仪器自动进行修正。

一般规定，绝对误差和修正值的量纲必须与测得值一致。

绝对误差虽然可以说明测得值偏离实际值的程度，但不能说明测量的准确程度。

【例3】测量两个电压，其实际值为 $V_1=100\text{V}$ ， $V_2=5\text{V}$ ；而测得值分别为101V和6V。则绝对误差

$$\Delta V_1 = 101 - 100 = 1(\text{V})$$

$$\Delta V_2 = 6 - 5 = 1(\text{V})$$

二者的绝对误差相同，但其误差的影响是不同的，前者比后者测量的准确。为了表征这一特点，应当采用相对误差。

2. 相对误差

(1) 定义：测量的绝对误差与被测量的真值之比（用百分数表示），称为相对误差。

$$\gamma_0 = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\% \quad (1.3.5)$$

因为一般情况下得不到真值，所以可用绝对误差与实际值之比来表示相对误差（必要时称它为实际相对误差），用 γ_A 表示

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% = \frac{x - A}{A} \times 100\% \quad (1.3.6)$$

$$\text{继前例 } \gamma_{A1} = \frac{\Delta V_1}{V_1} \times 100\% = \frac{1}{100} \times 100\% = 1\%$$

$$\gamma_{A2} = \frac{\Delta V_2}{V_2} \times 100\% = \frac{1}{5} \times 100\% = 20\%$$

可见，用相对误差可以恰当地表征测量的准确程度。相对误差是一个只有大小和符号，而没有量纲的数值。

在误差较小、要求不太严格的场合，也可以用仪器的测得值代替实际值。这时的相对误差称为示值相对误差，用 γ_x 表示。

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.3.7)$$

式中 Δx 由所用仪器的准确度等级 (详见后述) 定出。由于 x 中含有误差, 所以 γ_x 只适用于近似测量。对于一般的工程测量, 用 γ_x 来表示测量的准确度, 比较方便。

(2) 分贝误差

用对数形式表示的误差称为分贝误差, 常用于表示增益或声强等传输函数值。

设输出量与输入量 (例如电压) 测得值之比为 V_o/V_i , 则增益的分贝值

$$G_x = 20 \lg \frac{V_o}{V_i} [\text{dB}] = 20 \lg A_v [\text{dB}] \quad (1.3.8)$$

式中 $A_v = V_o/V_i$, 是电压放大倍数的测得值

又因 $A_v = A + \Delta A$

式中 A 是放大倍数的实际值。

$$\begin{aligned} \text{则 } G_x &= 20 \lg(A + \Delta A) = 20 \lg \left[A \left(1 + \frac{\Delta A}{A} \right) \right] \\ &= 20 \lg A + 20 \lg(1 + \gamma_A) \end{aligned}$$

$$\text{式中 } \gamma_A = \frac{\Delta A}{A}$$

$$\text{所以 } G_x = G + 20 \lg(1 + \gamma_A)$$

式中 $G = 20 \lg A$, 是增益的实际值, $20 \lg(1 + \gamma_A)$ 是 G_x 的误差项。

$$\text{令 } \gamma_{dB} = 20 \lg(1 + \gamma_A) \approx 20 \lg(1 + \gamma_x) \quad (1.3.9)$$

$$\text{式中 } \gamma_x = \frac{\Delta A}{A_v}, \text{ 取 } \gamma_x \approx \gamma_A.$$

【例4】测量一个放大器, 已知 $V_i = 1.2 \text{mV}$, $V_o = 6000 \text{mV}$, 设 V_i 的误差忽略不计, 而 V_o 的测量误差 γ_v 为 $\pm 3\%$ 时, 求放大倍数的绝对误差 ΔA 、相对误差 γ_x 及分贝误差 γ_{dB} 。

$$\text{电压放大倍数 } A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{6000}{1.2} = 5000$$

$$\text{增益 } G_x = 20 \lg A_v = 20 \lg 5000 = 74 \text{dB}$$

V_o 的绝对误差 $\Delta V_o = \gamma_v \cdot V_o = (\pm 3\%) \times 6000 = \pm 180 \text{mV}$, 因为仅考虑 V_o 的误差, 所以

$$\Delta A = \frac{\Delta V_o}{V_i} = \frac{\pm 180}{1.2} = \pm 150$$

$$\gamma_x = \frac{\Delta A}{A_v} = \frac{\pm 150}{5000} \times 100\% = \pm 3\%$$

可见当仅考虑 V_o 有误差时, $\gamma_x = \gamma_v = \pm 3\%$

$$\begin{aligned} \text{所以 } \gamma_{dB} &= 20 \lg(1 + \gamma_x) \\ &= 20 \lg[1 + (\pm 3\%)] \approx \pm 0.26(\text{dB}) \end{aligned}$$

测量的报告值写作 $G_x = 74 \pm 0.26 \text{dB}$ 。

式(1.3.9)也可以用下列近似公式表示*

$$\gamma_{dB} \approx 8.69 \gamma_x \quad (1.3.10)$$

* 式(1.3.10)的推导如下:

由式(1.3.9)知 $\gamma_{dB} \approx 20 \lg(1 + \gamma_x)$

因 $\lg(1 + \gamma_x) = 0.4343 \ln(1 + \gamma_x)$

当 $\gamma_x \ll 1$ 时, $\ln(1 + \gamma_x) \approx \gamma_x$, 则

$$\gamma_{dB} \approx 20 \times 0.4343 \ln \gamma_x \approx 8.69 \gamma_x$$

或 $\gamma_x \approx 0.115 \gamma_{dB}$

$$\gamma_x \approx 0.115 \gamma_{dB} \quad (1.3.11)$$

上例,

$$\gamma_{dB} \approx 8.69 \times (\pm 3\%) \approx \pm 0.26 \text{ dB}$$

当表示功率增益时

$$\gamma_{dB} = 10 \lg(1 + \gamma_p) [\text{dB}] \quad (1.3.12)$$

式中 γ_p 是功率放大倍数的相对误差。因为 γ_x 及 γ_p 都是有正负号的量, 所以分贝误差 γ_{dB} 也有正负号。

由上述可见, 测得值的相对误差愈小, 表示它的准确度愈高。所以评价测量水平时应当用相对误差来比较, 它是误差计算中最常用的一种表达形式。

三、电子测量仪器误差的表示方法

误差, 除了用于表示测量结果的准确程度以外, 也是电子测量仪器重要的质量指标。为了保证仪器示值的准确, 必须在出厂时, 由检验部门对其误差指标进行严格的检验。我国部颁标准*规定用工作误差、固有误差、影响误差和稳定误差等来表征其性能。

1. 工作误差: 是在**额定工作条件****下测定的仪器误差极限。即来自仪器外部的各种影响量(例如温度、湿度、大气压力、供电电源等)和影响特性(仪器的一个工作特性的变化对另一个工作特性的影响, 例如低频信号发生器的频率变化对输出电压的影响)为任意可能的组合时, 仪器的工作误差可能达到的最大极限值。这种表示方法的优点是, 对使用者非常方便, 可以利用工作误差直接估计测量结果误差的最大范围。缺点是, 它是在最不利的组合条件下给出的, 而实际使用中构成最不利组合的可能性很小。因此, 用仪器的工作误差来估计测量结果的误差会偏大。

2. 固有误差: 是当仪器的各种影响量与影响特性处于**基准条件*****时, 仪器所具有的误差。这些基准条件是比较严格的, 所以这种误差指标能够更准确地反映仪器所固有的性能。便于在相同条件下, 对同类仪器进行比较和校准。

3. 影响误差: 是当一个影响量在其额定使用范围内(或一个影响特性在其有效范围内)取任一值, 而其它影响量和影响特性均处于基准条件时所测得的误差。例如温度误差、频率误差等。只有当某一影响量在工作误差中起重要作用时才给出, 它是一种误差的极限。

4. 稳定误差: 是仪器的标称值在其它影响量及影响特性保持恒定的情况下, 于规定时间内所产生的误差极限。习惯上以相对误差形式给出或者注明最长连续工作时间。

例如, DS-33 型交流数字电压表就是用这四种误差标注的。工作误差: 50 Hz~1 MHz, 10 mV~1 V 量程为 $(\pm 15\%) \pm (\text{满量程的 } 0.5\%)$; 固有误差: 1 KHz, 1 V 时为读数的 $\pm 0.4\% \pm 1$ 个字; 温度影响误差: 1 KHz, 1 V 时的温度系数为 $10^{-4}/^\circ\text{C}$; 频率影响误差: 50 Hz~1 MHz 为 $(\pm 0.5\%) \pm (\text{满量程的 } 0.1\%)$; 稳定误差: 在温度 $-10^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$, 相对湿度 80% 以下, 大气压力 650~800 mm Hg 的环境内, 连续工作七小时。

目前还有一些电子测量仪器仍根据 1965 年制定的《无线电测量仪器总技术条件(草案)》,

* 见原第四机械工业部颁发的 SJ943—82《电子测量仪器误差的一般规定》。

** 额定工作条件指给定影响量的额定使用范围和给定工作特性的有效范围的总合, 仪器在此条件下使用时, 保证工作误差极限的要求。

*** 基准条件指对各影响量所规定的一组标明了公差数值或范围, 例如环境温度 $(20 \pm 2^\circ\text{C})$, 相对湿度 $(45 \sim 75\%)$, 大气压强 $(860 \sim 1060 \text{ mmHg})$, 近似等于 $650 \sim 800 \text{ mmHg}$, 交流电源 $(220 \text{ V} \pm 2\%, 50 \text{ Hz} \pm 1\%, \text{正弦波})$, 无外界电磁干扰, 工作位置符合制造厂规定等。

按使用条件给出基本误差及附加误差。

1. 基本误差：它是指仪器在规定的**正常工作条件***下所具有的误差。与前述固有误差的意义基本相同，但这里所限定的测试条件较宽。

由于绝对误差不能说明准确程度，所以很少单独用它来表示仪器的误差。用前述的相对误差虽然可以较好地反映测量的准确程度，但它不能评价仪器的准确程度，也不便于划分仪器的准确度等级。因为仪器仪表的可测范围不是一个点而是一个量程。在此量程内，被测量可能处于不同的位置，用式（1.3.6）计算时，式中的分母需取不同的数值，使仪器的误差数值难以标注。所以又提出了满度相对误差亦称**引用误差**。这里说的“满度”和“量程”的意义基本相同，但与“测量范围”是不同的。**测量范围**是指在允许误差限内计量器具的被测量值的范围，例如中心指零的电压表的测量范围为由-10 V至+10 V，而其量程则为20 V。所以对一只仪表仅仅给出量程是无法判断其测量范围的，这时只能认为其刻度线始点数字为零。

满度相对误差是绝对误差与测量范围上限值或量程满度值 x_m 的比值（用百分数表示），即

$$\gamma_M = \frac{|\Delta x_m|}{x_m} \times 100\% \quad (1.3.13)$$

式中 Δx_m 是仪器仪表整个刻度线上出现的最大的绝对误差。

因为仪器仪表刻度线上各点示值的绝对误差并不相等，为了评价仪表的准确度。所以取最大的绝对误差（绝对值）。

γ_M 是仪器在正常工作条件下不应超过的最大的相对误差。仪表的刻度线上各处都可能出现 Δx_m 值，所以从最大误差出发，对测量者来说，在没有修正值的情况下，应当认为指针在不同偏转角时的示值误差处处相等，即在一个量程内各处示值的最大绝对误差 Δx_m 是个常数。一般称此为**误差的整量化**。

这种误差表示方法比较多地用在电工仪表中，其准确度等级分为0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0七级，分别表示它们满度相对误差百分数的分子可能出现的最大的数值（指绝对值）。对于电子测量仪器引用误差的优先数列为1, 2, 3, 5, 7。上述等级值通常用 S 表示。例如 $S=1$ ，说明仪表的满度相对误差不超过 $\pm 1\%$ 。

对于某些测量仪器的准确度可以用误差的绝对数值和相对数值两项代数之和的形式来表示。例如，一种数字电压表的基本误差为 $(\pm 0.1\%) \pm (1 \text{ 个字})$ ，其中 $\pm 0.1\%$ 是相对数值，而 ± 1 个字是绝对数值。仅就绝对数值而言，当用最末尾一位数码管显示电压值（mV）时，就会有 $\pm 1 \text{ mV}$ 的误差，显然，在测量5 mV电压时，可能显示4或6 mV，绝对误差起主要作用；而在测量10000 mV时，可能显示9999或10001 mV，这时相对数值（ $\pm 0.1\%$ ）起主要作用。可见当使其显示的位数尽量多时，可以减小测量误差。这是在使用时应当注意的。

2. 附加误差：它是指由于仪器超出规定的正常工作条件时所增加的误差。例如环境温度、电源电压等因素偏离正常条件所引起的示值相对于正常条件下示值的最大偏差**。与前述

* 这里的正常条件与前述的基准条件基本相同，但没有后者那样严格。例如环境温度为 $(20 \pm 5^\circ\text{C})$ ，相对湿度为 $(65 \pm 15)\%$ ，大气压强为 $(750 \pm 30 \text{ mm Hg})$ ，交流电源电压为 $(220 \text{ V} \pm 2\%)$ 等。

** 从误差定义来说，附加误差不符合误差定义，它不是示值与实际值之差，而是示值的偏差，或者说是影响量。这里只是用误差形式来表示。

的影响误差相似，也用百分数表示。

例如，MF-20 型晶体管繁用表就是用这种误差标注的。基本误差：直流电压、电流为 $\pm 2.5\%$ ，附加误差：电池电压降至 5.5~4.5 V 时（额定值为 6 V），附加 $\pm 1\%$ 。环境温度在 0~40°C 范围内（额定值为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ），每变化 10°C 附加 $\pm 2.5\%$ 。

在使用时，除考虑仪器本身的基本误差外，还要加上附加误差。

采用基本误差与附加误差的形式，对于使用者来说，掌握各分项误差大小是有利的，但在估计仪器的总误差时要进行误差合成计算。

四、一次直接测量时最大误差的估计

实际工作中，在要求不高的情况下，往往只做一次直接测量而取得测量结果。这时如何从测量仪器仪表的准确度等级来确定测量误差呢？

设只有基本误差的情况下，仪器仪表的最大绝对误差为

$$\Delta x_m = \pm S\% \cdot x_m \quad (1.3.14)$$

Δx_m 与示值 x 的比值，即最大的示值相对误差

$$\gamma_{xm} = \frac{\Delta x_m}{x} \times 100\% = \pm S\% \cdot \frac{x_m}{x} \quad (1.3.15)$$

可见， γ_{xm} 不仅与仪器仪表的准确度 S 有关，而且与满度值 x_m 和示值 x 的比值有关。其比值愈大， γ_{xm} 愈大，即测量误差愈大。

这个关系可以用图 1.3.1 近似说明，示值 x 大时，相对误差 γ 小。当 x 等于满度值时（图中分度值为 100 处，即 $x = x_m$ ）， $x_m/x = 1$ ，这时由式 (1.3.15) 可知 $\gamma_{xm} = \pm S\%$ 。可见，仪器仪表给出的准确度 $\pm S\%$ 是相对误差的最小值，离开满度值愈远，误差愈大。

所以，当仪器仪表的准确度给定时，示值愈接近满度值，示值的准确度愈高。当使用一般电压电流表时，应尽可能使指针偏转位置在靠近满度值的 1/3 区域内。

反之，在选择仪表量程时，应该使其满度值尽量接近被测量数值，至少不应比被测量值大得太多。

【例 5】用 MF-20 型晶体管繁用表交流电压 30 V 档，分别测量 6 V 及 20 V 电压，求最大示值相对误差。此表交流电压档的准确度为 4 级。

$$\begin{aligned} \text{当 } V_x = 6 \text{ V 时, } \gamma_{xm} &= \pm S\% \cdot \frac{V_m}{V_x} = \pm 4\% \times \frac{30}{6} \\ &= \pm 20\% \end{aligned}$$

$$\text{当 } V_x = 20 \text{ V 时, } \gamma_{xm} = \pm 4\% \times \frac{30}{20} = \pm 6\%$$

可见指针偏转角度较大时，测量误差较小。

【例 6】被测量的实际值 $V = 10$ 伏，现有：(1) 150 V，0.5 级和 (2) 15 V，2.5 级两只

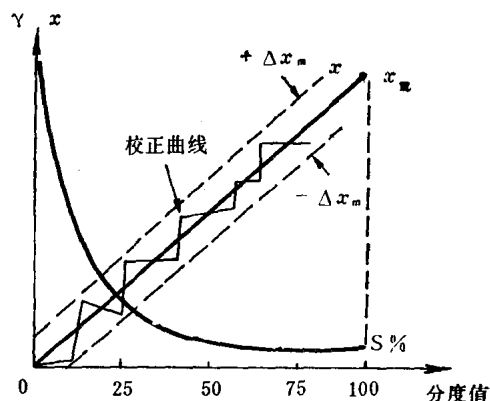


图 1.3.1 相对误差与刻度线分度值的关系

电压表, 选择哪只表测量误差较小?

用 (1) 表时, $\Delta V_m = \pm 0.5\% \times 150 = 0.75 \text{ V}$, 示值范围为 $10 \pm 0.75 \text{ V}$ 。

用 (2) 表时, $\Delta V_m = \pm 2.5\% \times 15 = 0.375 \text{ (V)}$, 示值范围为 $10 \pm 0.375 \text{ V}$ 。

可见, 这时选择 2.5 级的表比选 0.5 级的表测量误差小。所以要合理选择仪器仪表的量程及准确度等级, 不能单纯追求仪器仪表的级别 (当然还有仪表内阻的影响问题)。

上述根据式 (1.3.15) 得出的应尽可能使仪表指针偏转的位置靠近满度值的结论只适于正向刻度的一般电压电流表等类型的仪表。而对于普通型测量电阻的欧姆表 (或万用表的欧姆档) 就不适用了。因为它是反向刻度, 而且其刻度是非线性的。图 1.3.2(a) 是欧姆表测量电阻时的简化电路, 当被测电阻 R_x 不接入时 (即 $R_x = \infty$), 回路电流 $I = 0$; 当 $R_x = 0$ (即 A、B 两端短接时), $I = I_m = E/R_i$ (R_i 是总电阻)。用此电流值表示被测电阻时, 指针的起始位置 ($I = 0$), $R_x = \infty$; 而满度值 ($I = I_m$) 时, $R_x = 0$, 所以是反向刻度, 具有无限测量范围, 见图 1.3.2(b)

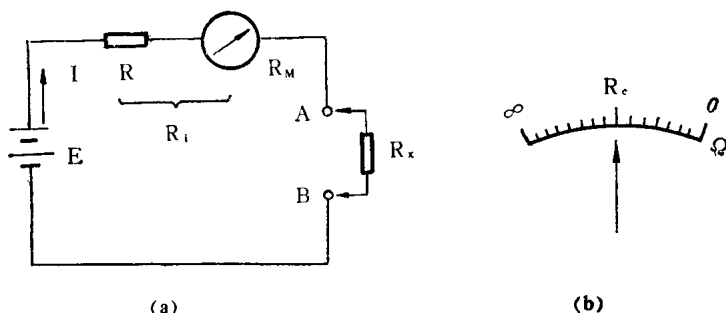


图 1.3.2 欧姆表测量电阻的简化电路

指针的偏转角度

$$\alpha_x = S_I \cdot I = S_I \cdot \frac{E}{R_i + R_x} \quad (1.3.16)$$

式中 S_I 是灵敏度。

当 $R_x = R_i$ 时

$$\alpha_x = S_I \cdot \frac{E}{2 R_i} = \frac{1}{2} S_I \cdot I_m = \frac{\alpha_m}{2}$$

式中 $\alpha_m = S_I \cdot I_m$, 是满偏转角度。

这时指针位于刻度线的中心位置, 它等于欧姆表在该量程时内部的总电阻, 称为中值电阻 (R_c)。在设计或检定欧姆表时均以中值电阻为基准, 所以在使用时应尽可能使表针指在中心位置附近的区域 (而不是满偏转位置), 一般以中值的 (0.2~5) 倍之间为宜。

欧姆表的准确度 (即中值处的误差) 是这样规定的: 因为中值处 $R_i = R_c$ 。

$$\alpha_m = S_I \cdot I_m = S_I \cdot \frac{E}{R_i} = S_I \cdot \frac{E}{R_c}$$

所以

$$S_I \cdot E = \alpha_m \cdot R_c$$

由式 (1.3.16) 知

$$\alpha_x = \frac{S_I E}{R_i + R_x} = \alpha_m \frac{R_c}{R_c + R_x} \quad (1.3.17)$$

整理后可得

$$R_x = \left(\frac{\alpha_m}{\alpha_x} - 1 \right) R_c \quad (1.3.18)$$

对式 (1.3.18) 求导, 并用增量表示

$$\Delta R_x = - \frac{\alpha_m}{\alpha_x^2} R_c \Delta \alpha_x$$

则相对误差

$$\gamma_R = \frac{\Delta R_x}{R_x} = - \frac{\alpha_m}{\alpha_x (\alpha_m - \alpha_x)} \Delta \alpha_x \quad (1.3.19)$$

由此式可知指针偏转角度 $\alpha_x = 0$ 时, $\frac{\Delta R_x}{R_x} \rightarrow \infty$; 当 $\alpha_x = \alpha_m$ 时也是 $\frac{\Delta R_x}{R_x} \rightarrow \infty$ 。可见在刻度线两个端点附近的误差是最大的。

中值处 $\alpha_x = \frac{1}{2} \alpha_m$, 其相对误差

$$\gamma_R = \frac{\Delta R_x}{R_x} = - \frac{\alpha_m}{\frac{\alpha_m}{2} \left(\alpha_m - \frac{1}{2} \alpha_m \right)} \Delta \alpha_x = -4 \frac{\Delta \alpha_x}{\alpha_m} \quad (1.3.20)$$

当以刻度的弧线长度代替偏转角度时

$$\gamma_R = \frac{\Delta R_x}{R_x} = -4 \frac{\Delta l}{l_m} \quad (1.3.21)$$

式中负号表示反向刻度。

这就是欧姆表准确度的表达式, 即仪表厂用刻度线长度的百分数给出的最大相对误差值 (式中 Δl 应取最大值)。例如刻度线长度 $l_m = 100 \text{ mm}$, 最大的绝对误差 $\Delta l = 0.6 \text{ mm}$, 则

$$|\gamma_R| = \left| \frac{\Delta R_x}{R_x} \right| = 4 \times \frac{0.6}{100} = 2.4\%$$

度盘上标注 2.5 级, 符号为 $\sqrt{2.5}$ 。使用这种仪表时, 由准确度等级算出 $\Delta R_x = \pm S\% \cdot R_x$, 再算出示值相对误差 $\gamma_R = \Delta R_x / R_x$ 。

综上所述, 仪表准确度的级别对测量结果的影响很大。应当特别指出的是所用仪表的准确度并不是测量结果的准确度, 只有在示值与满度值 (或中值) 相同时, 二者才相等。否则测得值的准确度数将低于仪表的准确度等级。仪表的准确度等级 S 只能说明在规定条件下使用时, 它的最大绝对误差不超过满度值 (或中值) 的 $\pm S\%$ 。所以一定不要把仪器仪表的准确度等级和测量结果的准确度混为一谈。

1.4 测量方法

一个物理量的测量, 可以通过不同的方法来实现。

一、测量方法的分类

1. 直接测量与间接测量

(1) 直接测量