

DIANZI CELIANG YU YIQI

电子测量与仪器

张学庄 廖翊希 编

DIANZI CELIANG YU YIQI

湖南科学技术出版社

电子测量与仪器

张学庄 廖翊希 编

湖南科学技术出版社

电子测量与仪器

编 者:张学庄 廖翊希

责任编辑:杨 林 占 华

出版发行:湖南科学技术出版社

社 址:长沙市展览馆路 66 号

<http://www.hnstp.com>

邮购联系:本社直销科 0731-4441720

印 刷:湖南广播电视报印刷厂

厂 址:长沙市雨花路 27 号

邮 编:410007

(印装质量问题请直接与本厂联系)

出版日期:2000 年 10 月第 1 版第 7 次

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:12.25

字 数:296000

印 数:21601~24600

书 号:ISBN 7-5357-1631-8/TN·45

定 价:18.00 元

(版权所有·翻印必究)

内 容 简 介

本书由中央广播电视大学审定作为广播电视大学电子工程类各专业必修的专业基础课教材，也可作为其他有关专业的选修课教材。

本书全面介绍了波形测试、时间频率、电压、集中参数测量仪器及信号发生器的原理、性能及使用；还介绍了电子测量仪器的发展现状。特别对实用性很强的电子测量仪器的使用、维修和校准原则与技术作了全面的介绍，注意引导读者自己动手解决各种问题。并通过对高精度频率测量最新科研成果的介绍，使读者对过去普遍忽视的电子仪器校准问题予以重视。

本书对广大电子工程技术人员和无线电爱好者亦有较大的参考价值。

前 言

本书是根据中央广播电视大学《电子测量与仪器》课程教学大纲编写的。

本课程是广播电视大学电子工程类各专业必修的专业基础课，也可作为其他有关专业的选修课。

课程的任务是使学生掌握常用的电子测量原理和方法；介绍常用的典型电子测量仪器的原理、性能和使用以及电子测量仪器的发展动态；讲解测量误差的基本知识等。

依据国家对高等专科教育的基本要求和广播电视大学的培养目标，教材内容必须符合培养应用型高等专门人才的要求，基础理论教学以应用为目的，教学内容以必需和够用为度，应加强应用技术与实践能力的培养等要求，因此，本教材在电子仪器的使用、维修与校准这些实用性很强的内容上作了较多的介绍，在内容深度方面也作了一点尝试，对某些仪器的最新发展作了介绍。

本教材由中南工业大学张学庄教授主编，并编写了教材的第一、四、八、九章；湖南广播电视大学廖翊希副教授担任本教材主持，并编写了第二、三、五、六、七章。

教材由华中理工大学康华光教授担任主审。

本教材是在1988年出版的广播电视大学教材《电子仪器与测量原理》基础上补充、修改而成。原编者还有湖南广播电视大学的张学孚副教授，四川广播电视大学的简德华副教授和贵州广播电视大学的魏春珍副教授，审校有清华大学童诗白教授，张乃国高级工程师。

限于水平和经验，本教材定有不足之处，切盼读者批评指正。

编 者

1993年11月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 电子测量的意义及特点	(1)
一、电子测量的意义	(1)
二、电子测量的特点	(1)
第二节 电子测量方法及仪器的分类.....	(3)
一、测量方法的分类	(3)
二、测量仪器的分类	(4)
第三节 测量误差的基本知识	(4)
一、基本概念	(5)
二、测量误差的来源	(7)
三、测量误差的分类	(7)
四、测量结果的评定	(8)
第四节 本课程的任务.....	(10)
第二章 波形测试与仪器	(12)
第一节 波形显示原理.....	(12)
一、示波管	(12)
二、波形显示原理	(14)
第二节 电子示波器的基本组成	(17)
一、示波器的特点和分类	(17)
二、通用示波器的基本组成	(17)
三、示波器的垂直通道 (Y 轴系统)	(18)
四、示波器的水平通道 (X 轴系统)	(19)
第三节 示波器的多波形显示和双扫描显示	(24)
一、双线显示和双踪显示	(24)
二、双扫描示波显示	(25)
第四节 取样示波器	(29)
一、取样示波器的基本原理	(29)
二、取样示波器的组成	(30)
三、取样示波器的主要技术性能	(31)
第五节 存取示波器	(32)
一、记忆示波器	(32)
二、数字存储示波器	(32)
思考题与习题	(33)
第三章 示波器的使用与功能扩展实例	(34)
第一节 示波器的使用.....	(34)

一、主要技术性能	(35)
二、面板布置	(37)
三、使用方法	(38)
四、测量实例	(38)
第二节 示波器的功能扩展实例 (一) —— 图示仪	(41)
一、晶体管特性的测试方法	(42)
二、图示仪的基本组成	(43)
三、图示仪的应用	(43)
第三节 示波器的功能扩展 (二) —— 频率特性测试仪	(52)
一、频率特性测试方法	(52)
二、频率特性测试仪的组成和原理	(54)
三、扫频仪的应用	(57)
思考题与习题	(67)
第四章 频率与时间的测量	(68)
第一节 各种测频方法简介	(68)
一、概述	(68)
二、频率测量方法简介	(69)
第二节 电子计数器测量频率	(69)
一、电子计数式频率计测频原理	(70)
二、电子计数式频率计的组成	(70)
三、用大规模集成电路为主体构成频率计	(74)
四、数字测频误差分析	(77)
第三节 电子计数器测量周期	(78)
一、电子计数器测量周期的原理	(79)
二、周期测量的误差	(79)
三、时间间隔测量方法	(80)
四、通用电子计数器	(81)
五、频率计的使用	(87)
第四节 频率标准与校频	(90)
一、频率标准简介	(90)
二、晶振频率校准方法	(91)
第五节 频率测量技术的发展	(93)
一、全同步取样技术	(93)
二、“可自校准”的通用电子计数器	(94)
思考题与习题	(95)
第五章 电压测量技术与仪器	(96)
第一节 概述	(96)
一、电压测量的特点	(96)
二、交流电压值的表示方法	(96)
第二节 模拟式电子电压表的基本原理	(97)
一、均值电压表	(97)
二、峰值电压表	(98)
三、有效值电压表	(98)

第三节	模拟式电子电压表的使用	(101)
一、	均值电压表的使用方法	(101)
二、	峰值电压表的使用方法	(102)
三、	测量实例	(103)
第四节	电压的数字测量方法和数字电压表	(104)
一、	比较型	(104)
二、	积分型 ($U-f$ 型)	(106)
三、	双积分型	(106)
四、	DS-14-1 型数字电压表	(107)
第五节	数字多用表	(111)
一、	DT830 型多用表基本原理	(111)
二、	DT830 型数字多用表的基本使用方法	(113)
	思考题与习题	(114)
第六章	集中参数的测量与仪器	(115)
第一节	集中参数测量方法简介	(115)
第二节	谐振法测量电容、电感和 Q 值	(115)
一、	谐振法测量电容	(115)
二、	谐振法测量电感	(117)
三、	谐振法测量 Q 值	(118)
四、	Q 表原理及使用	(119)
第三节	测量 R 、 L 、 C 的数字化方法	(121)
一、	利用电阻——电压变换器测量电阻	(122)
二、	利用阻抗——电压变换器测量阻抗	(122)
三、	L 、 C 、 R 数字式测量仪	(123)
	思考题与习题	(125)
第七章	测量用信号源	(126)
第一节	信号发生器的功用和分类	(126)
一、	信号发生器的功用	(126)
二、	信号发生器的分类	(127)
三、	正弦信号发生器的工作特性	(127)
第二节	低频信号发生器	(129)
一、	组成及工作原理	(129)
二、	低频振荡器	(130)
三、	XD-1 型低频信号发生器	(134)
四、	低频信号发生器的选型	(136)
第三节	高频信号发生器	(137)
一、	高频信号发生器的工作原理	(137)
二、	XFG-7 型高频信号发生器及其使用	(138)
第四节	其他信号发生器	(142)
一、	脉冲信号发生器	(142)
二、	合成信号发生器	(143)
	思考题和习题	(147)
第八章	电子仪器的校验与维修	(148)

第一节 电子仪器校验与维修的意义	(148)
一、校验与维修的重要性	(149)
二、对维修人员的基本要求	(149)
三、电子仪器修理室的装备	(153)
第二节 电子仪器检修的步骤和方法	(155)
一、电子仪器检修的步骤	(155)
二、检查故障的一般方法	(157)
第三节 检修实例	(160)
一、直流稳压电源的检修	(160)
二、数字频率计的检修	(162)
第四节 电子测量仪器的校准	(164)
一、校准工作应考虑的几个问题	(164)
二、校准的原则	(166)
三、校准的方法	(167)
思考题与习题	(170)
第九章 电子测量技术的应用和发展	(172)
第一节 电子仪器的综合运用	(172)
一、综合运用中应考虑的几个问题	(172)
二、综合运用实例	(173)
第二节 智能仪器	(174)
一、个人仪器	(176)
二、便携式多功能智能仪器	(179)
第三节 自动测试系统	(180)
一、自动测试系统的发展概况	(180)
二、自动测试系统的组建	(181)
三、第三代自动测试系统示例	(183)
附录 GPIB 系统的组成	(184)

第一章 绪论

第一节 电子测量的意义及特点

一、电子测量的意义

测量是用数值和单位来描述被测对象基本属性的过程，也是帮助人们认识事物、认识世界、改造世界的一种强有力的手段。

在日常生活中，人们常和各种简单的测量打交道。一个人穿某种尺码的衣服鞋帽而不管是哪家工厂制造；不同工厂出的体温计的读数都可以作为病人是否发烧的依据；建筑工人用标准尺寸的预制构件和门窗能方便地造出房子等等。因为他们只需要用简单的长度测量工具——尺，卷尺以及普通的温度计就能做到。

但是，要使汽车或飞机的精密零配件能够互换；使半导体发光管射出特定波长、不同颜色的光；使测量10公里的距离而误差仅1毫米或者把同步卫星定点在三万六千公里远处确定的空间坐标点上，就不这么简单了。尽管同样是长度或距离的测量，但其量程覆盖了从零点几微米的光波长到数万公里的空间距离；其精确度从 $\pm 0.1\%$ 到 $\pm 10^{-7}$ 以至更高的水平；其复杂程度从简单的单台测长仪到由配置在陆地和海洋上多个卫星测控站、测量船、测控中心等构成的庞大的测量与实时监控系统。这里工作着成千上万种电子测量仪器，它们各自执行着自己的特殊测量任务，用各种数字、灯光信号、图形、曲线、表格等等显示出测量的结果，一次又一次地自动、适时地进行各项测量。

假如你有机会登上现代巨型飞机的驾驶室，假如你能乘着汽车参观数公里长的汽车生产自动线，或者进入某研究所的各种实验室，以至现代化工厂的车间，你会发现到处都有数字显示的仪表、像计算机那样的显示屏以及计算机控制的仪表。它们无处不在！它们都是电子测量仪器，是利用电子技术、特别是微型计算机技术进行各项测量和完成各种任务的电子仪器与设备。利用电子技术为手段的测量，称为电子测量。

现在，电子测量几乎已涉及到所有电量、磁量以及各种非电量的测量。它广泛应用于科学研究、实验测试、工业生产、国防建设、无线电通信、遥测、数据处理以及医学、环境保护等领域，成为现代科学技术中不可缺少的手段。

电子测量是一门发展迅速，与现代科学技术密切相关并起着巨大推动作用的独立学科。从某种意义上说，近代科学技术的水平是由电子测量技术的水平来保证和体现的；电子测量的水平，也是衡量一个国家科学技术水平的重要标志之一。

二、电子测量的特点

与其它形式的测量相比，电子测量具有以下几个突出的特点：

1. 测量准确度高

采用电子计数的方法，用数字显示测量结果，使仪表的读数误差大大减少，这是采用电

电子技术用于测量的明显好处。例如数字电压表很容易读出准确到 mV 的电压，比指针式电压表要好得多。但问题不只是电子仪器读数精度高。

在电子测量领域中，目前人类在频率和时间的测量方面，达到的最高测量准确度为 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ 量级！这么小的误差真是难以想象。假如用测量距离作例子，误差小到 10^{-13} ，就相当于测量 1 千万公里的距离误差仅 1 毫米！

由于频率测量能达到很高的测量准确度，所以，人们把很多需要精确测量的量转换成频率进行测量，例如，用石英晶体作温度—频率转换器，将测温误差减少到千分之几摄氏度；用距离—时间转换，使测距误差减小到 10^{-8} 量级等等。

当微处理器和微型计算机进入电子测量领域后，由于数据处理技术的进步，使测量误差进一步减小了。电子测量技术随着科学技术的突飞猛进而不断进步，同步发展，电子测量仪器的精度仍在不断提高。

2. 自动化程度高

利用电子技术，特别是带有微处理器的电子仪器或者是由微型计算机控制的电子测量仪器，很容易做到对某个量或一些量进行自动测量。从简单的重复测量、定时测量到根据需要在适当的时候自动进行测量和数据处理，不需要人的干预。

显然，因为不要人参与测量，我们可以让仪器从事一些长时期不间断的、对人来说是枯燥无味的测量。仪器能不知疲倦地工作，测量结果客观正确，例如：连续多日对高稳定度晶体振荡器的长期稳定性测量；或者对地壳形变的长期连续监测。

也可以在人不能去的地方或有碍人的健康和生命安全的地方进行测量，例如：探险和高空探测仪器；核反应堆探测仪器，自动观测气象站等等——这就是采用遥测技术。

还有很多需要迅速得出测量结果，或是需要快速反应进行测量的地方，如记录百米赛的结果、测定炮弹的初速度等等，这些测量也是非电子测量莫属。

3. 易于与计算机连接

电子测量仪器大多数能输出数字信息，很便于通过专门的接口与计算机相连接，一方面使测量结果送入计算机作数据处理、显示、存储、分析与打印，另一方面计算机可根据测试结果对被测对象进行控制，还可以对测量仪器本身作自校、校准、故障诊断等等。

即使是以模拟电信号形式输出测量结果的电子仪器，也可以通过 A/D、D/A 转换与计算机交换信息，达到同样的结果。

将多种测量仪器与计算机联机，就可以组成在计算机指挥下协调工作的自动测试系统。

在一些复杂的生产过程中，例如特种钢的冶炼，对各种元素在钢中的比例有严格的要求；对生产条件特别是温度，压力等参数有有效的控制。这里，不但由计算机控制着多种电子测量仪器，整个生产过程也受计算机控制。

在现代实验室中，自动测试系统能根据编好的程序，准确地完成大量的测试任务。

电子测量仪器与计算机技术的结合还产生出一种新型测量仪器——“个人仪器”。将具有某种测试功能的插件插入个人计算机的插槽中，配上相应的软件，就成了功能很强的测量仪器。个人计算机起着控制、记录输入信息、存储测量数据，进行数据处理的作用，一般都有误差计算、超警报警、图形与数据显示、打印等功能。

插入不同的测试插件及相应的软件，就能让同一台计算机完成不同的测量任务。一台计算机配备多块插件及相应软件就相当于拥有多台高性能的电子测量仪器。

在个人计算机日益普及的今天，个人仪器表现出很高的性能价格比，具有很强的生命力。

科学技术的飞速发展给电子测量技术提出了很多新课题,也给电子测量仪器的数字化、自动化、多功能、高性能、小型化提供了条件。发展电子测量技术,创造新的电子测量仪器,为科学技术发展提供新的测量手段是我们的光荣任务。

第二节 电子测量方法及仪器的分类

为了得到准确的测量结果,需要正确地选择测量仪器和测量方法。

一、测量方法的分类

电子测量的分类方法有多种,从应用的角度来看,这里介绍两种。

1. 按测量最终结果是如何取得的来分

(1) 直接测量——测量结果直接从仪器的刻度盘上读出或以数字显示出来,如用电压表测电压,用频率计测频率等。

(2) 间接测量——直接测量两个或两个以上的量,通过函数关系计算出待求量。例如测量了集电极电阻 R_C 的值并测出了 R_C 上的电压 U_{RC} 便可算出集电极电流 I_C 。

$$I_C = \frac{U_{RC}}{R_C} \quad (1-2-1)$$

这里,采用间接测量 I_C 的方法优于直接测 I_C ,因为它不必切断集电极电路接入电流表。

(3) 组合测量——当被测量与几个未知量有关,其函数关系比较复杂时,测量一次无法得出完整的结果。这时应改变测量条件并进行多次测量,然后按被测量与未知量之间的函数关系组成联立方程,求解出被测量。这种方法兼有直接测量与间接测量方法,故称组合测量。

例:用组合测量求电阻温度系数 α 、 β

列出函数式:

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \quad (1-2-2)$$

式中 R_{20} ——电阻在 20°C 时的数值;

t ——测试温度;

R_t ——在测试温度 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值。

式中 R_{20} , α , β 均为未知量。

采用组合测量法,用温度计与欧姆表及控温设备测定三个温度 (t_1 , t_2 , 及 t_3) 下的电阻值 R_{t1} , R_{t2} 及 R_{t3} 。

解联立方程

$$\begin{cases} R_{t1} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2 \\ R_{t2} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2 \\ R_{t3} = R_{20} + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2 \end{cases} \quad (1-2-3)$$

即可求出 α , β , 同时也可求得 R_{20} 。

组合测量在实施上比较麻烦,假如有微机控制的“电阻温度系数测量仪”,只要夹入试件,从计算机荧光屏上读取结果即可,这时就成为直接测量了。

2. 按被测量的性质分类

有些被测量是时间的函数,有的呈周期性变化,有的是随机变化的;有些量是频率的函数,对不同的频率其特性不同,需要根据测试的要求,选择不同的测量仪器和方法。

(1) 时域测量 电压、电流等物理量,与时间有关,其稳态值、有效值可用仪表直接测量;它们的瞬时值反映出随时间变化的规律可用示波器看到,还可用存贮示波器定量测出其瞬时值。

(2) 频域测量 放大电路的增益,网络的频率特性等与频率有关。测量时,被测量值是频率的函数;求得其频率特性或频谱特性。

(3) 数据域测量 指对数字量进行测量。例如,用具有多个输入通道的逻辑分析仪,可以同时观测许多单次并行的数据;对于微处理器地址、数据线上的信号,既可显示时序波形,也可用“1”、“0”显示其逻辑状态。

二、测量仪器的分类

电子测量仪器种类繁多,一般分为专用仪器和通用仪器两大类。专用仪器用于专用目的,如电视信号发生器专用于调试电视接收机,一般不作它用。通用仪器是用于测量一个或多个基本电参量的,如示波器,数字电压表等,应用面很广。

通用电子测量仪器按其功能可分为:

1. 信号发生器

用于提供各种测试信号。常见的按频率范围不同或输出波形不同分为低频信号发生器、高频信号发生器、脉冲信号发生器、扫频信号发生器、函数信号发生器及输出频率准确度很高的合成信号发生器等。

2. 信号分析仪器

信号分析仪器主要用于观测、分析和记录各种电量的时域或频域变化,包括各种示波器、波形分析仪及频谱分析仪等。

3. 时间、频率和相位测量仪器

包括各种测量时间间隔、时刻、周期性电信号的频率、周期及相位的仪器,如通用电子计数器、数字相位计及频率标准等。

4. 网络特性测量仪

用于测量电器网络的各种特性的仪器,如频率特性测试仪、阻抗测试仪及网络分析仪等。

5. 电子元器件参数测试仪

包括电子管测试仪、晶体管测试仪、图示仪、集成电路测试仪、电阻、电容及电感测试仪等。电子元器件种类繁多,新器件又不断涌现,有时一种元件就需检测众多的参数,也都需要测量。随着新器件使用面的开拓,一些工厂专用的仪器也可能转化成某种通用仪器。

6. 电波特性测量仪

用于对电波传播、电磁场强度等参量进行测量的仪器,如测试接收机、场强计、干扰测量仪等。

7. 数据域测试分析仪器

在计算机、通讯与控制设备或仪器中,需对数字信号进行测试与分析。常用的仪器有逻辑分析仪。

8. 辅助仪器

交流稳压电源、直流稳压电源及不间断电源(UPS)等作为辅助仪器,使得测量工作得以更好地进行。

第三节 测量误差的基本知识

考虑到读者大多在普通物理实验,电子技术基础实验等课程中已接触和学习过部分有关

测量误差与数据处理的知识,这里主要介绍或复习一下有关的误差与数据处理的内容,目的是在学习各测量仪器时,便于分析测量误差产生的原因,计算出误差的大小,也有利于找到提高测量精确度的方法。

从实用的角度考虑,本节将采用有重点介绍而不追求“全面”;在文字上力求通俗易懂,可能不太严格,有的只给出结论而不加证明,力求使读者了解使用条件能正确使用即可,如需详细考证可参考众多的书籍。

一、基本概念

真值——被测量的真值是指该物理量在测量进行的时间和空间条件下的真实量值。该量值是客观存在的一个确定数值。真值以 X_0 表示。

例如,三角形的内角和为 180° ,理论上存在,实际上也是对的。

又如时间标准,1967年第十三届国际计量大会规定铯-133 (Cs^{133}) 原子在基态的两个超精细能级间跃迁所对应辐射的 9,192,631,770 个周期的持续时间为一秒。这一秒的时间长度是客观存在的,它基于一种极为稳定的自然现象,自然规律,我们认为它也是真值。

大多数情况下,真值难于确定,通过测量只能接近真值。例如,我们用高一等级的计量标准仪器测得的值或者用多次测量求得的算术平均值并经系统误差修正后的结果,这些结果可以在实际工作中代替真值使用,其准确度满足规定的要求。通常将这些值称为实际值。

测量结果与被测量真值的差别就是测量误差。测量误差分为绝对误差和相对误差两种。

1. 绝对误差

绝对误差等于被测量的给出值 X 与其真值 X_0 之差,用公式表示为

$$\Delta X = X - X_0 \quad (1-3-1)$$

式中 ΔX ——绝对误差;

X ——被测量的给出值;

X_0 ——被测量的真值。

给出值 X 在测量中通常就是被测量的测得值(有时又称为观测值);

绝对误差是将测量值与真值比较之差,故也称为真误差或绝对真误差。

绝对误差为正值时,表示测得结果偏大。

修正值 C (或称改正数)

与绝对误差的绝对值相等但符号相反的值称为修正值

$$C = -\Delta X \quad (1-3-2)$$

因为给出值 X 中比真值大了 ΔX ,若对测量结果即给出值加一个修正值,结果就因 ΔX 被修正值 $-\Delta X$ 抵消变得没有误差而等于真值了。

$$\text{即: } X + (-\Delta X) = X_0 + \Delta X - \Delta X = X_0 \quad (1-3-3)$$

通常,在测量之前,总是通过校准设法求出修正值,例如测出仪器的系统误差,制定修正值表,以便得到更接近于真值的结果。在自动测量仪器中,修正值表可存贮在仪器中,对测量结果自动修正。

2. 相对误差

(1) 相对误差又叫相对真误差,它是绝对误差与真值之比,通常用百分数表示。若用 ν 表示相对误差,则

$$\nu = \frac{\Delta X}{X_0} \times (100\%) \quad (1-3-4)$$

相对误差的引入,能更好地反映出测量的准确程度,特别是在比较各测量结果的准确度时更是如此。例如测量频率,两个结果如下:

$$f_1 = 1000\text{Hz}, \Delta f_1 = 1\text{Hz}, \nu_{f_1} = 0.1\%;$$

$$f_2 = 10^7\text{Hz}, \Delta f_2 = 10\text{Hz}, \nu_{f_2} = 10^{-6} \text{ (以 } M \times 10^{-N} \text{ 表示数值较小的相对误差)}$$

比较两个绝对误差, Δf_2 比 Δf_1 大了 9Hz, 为 Δf_1 的 10 倍; 但 f_2 的测量相对误差远小于 f_1 的测量相对误差, 比 f_1 精确得多。

值得注意的是: 绝对误差有单位, 表示出误差的值是多少; 相对误差是一种比值, 反映误差占测量值的比例是多少, 反映出误差的影响程度, 或者说测量的精确程度。

以后我们会发现, 频率准确度的表示方法与相对真误差的表达式相同, 例如, 一个晶体振荡器的频率标称值为 F_0 , 实际值为 F , 频率绝对误差为 ΔF , ($\Delta F = F - F_0$)

频率准确度为 $\frac{\Delta F}{F_0}$ ——实际上是指晶振频率的相对真误差, 反映了频率不准确的程度, 或反映出晶振频率误差的程度。

在实际工作中, 无论从误差方面或是从准确度方面考察或描述一个测量过程, 实质上是说同一事物。

(2) 相对中误差

实际测量中, 往往得不到真值, 用此也求不出绝对真误差。这时, 我们可以用多次测量的方法求出多次测量的平均值, 作为实际值以代替真值, 又可算出算术平均值的标准偏差 $\sigma(\bar{X})$, 这时测量结果的相对误差为:

$$\frac{\sigma(\bar{X})}{\bar{X}} \quad (1-3-5)$$

由于标准偏差在一些书上称为均方根偏差或简称中误差, 故式 (1-3-5) 又称相对中误差。

(3) 满度相对误差

在一些用表盘连续刻度, 按指针读取结果的仪表中, 按每条刻度读得的值都是有误差的。为表征该仪表的准确度等级, 常采用电表量程满度值作为分母的满度相对误差 (或称引用相对误差):

$$\nu_n = \frac{\Delta X}{X_m} \quad (1-3-6)$$

式中 ν_n ——引用相对误差;

ΔX ——绝对误差;

X_m ——仪表的量程。

常用电工仪表分为 ± 0.1 、 ± 0.2 、 ± 0.5 、 ± 1.0 、 ± 1.5 、 ± 2.5 、 ± 5.0 七级, 分别表示它们的引用相对误差不超过 $\pm 0.1\%$ 至 $\pm 5.0\%$ 。

使用该类仪表时, 读数值的绝对误差只与满度相对误差 (准确度等级) 及满刻度值有关。

按式 (1-3-6)

$$\Delta X = \nu_n \times X_m \quad (1-3-7)$$

若某仪表的等级是 S 级, 它的满刻度值为 X_m , 被测量的真值为 X_0 , 则测量的绝对误差为

$$\Delta X \leq X_m \cdot S\% \quad (1-3-8)$$

测量的相对误差为

$$\nu \leq \frac{X_m \cdot S\%}{X_0} \quad (1-3-9)$$

当 $X_0 \rightarrow X_m$ 时, 即测量值愈接近满量程时, 相对误差越小, 测量越准确。通常应选择量程, 使读数在大于 $2/3$ 表盘刻度处进行为佳。

在检定该类仪表是否合格时, 先用与高准确度表比测或测量标准值的方法测出一些表盘刻划处的绝对误差 ΔX_i , 若最大的 ΔX_i 与满度值 X_m 之比小于表的准确度等级 $S\%$, 则表为合格。

测量误差还有其它一些表示方法, 从略。

二、测量误差的来源

为什么通过测量很难得到被测量的真值呢? 这是由于测量过程中不可避免地存在误差的缘故。

误差来源于以下几方面:

①仪器误差; ②人差; ③环境影响误差; ④测量方法误差。

上述误差中, 仪器误差通常是产生测量误差的主要来源。

1. 仪器误差: 由于仪器的电气或机械性能不完善, 致使仪器的精确度受到限制所产生的误差。

2. 人差: 由于人的感官分辨率的限制以及安装、调整与使用方面不够仔细等造成的误差。

3. 环境影响误差: 指环境温度、气压、湿度、电磁场、机械振动、光照与放射性影响造成的测量误差。通常应特别注意温度的影响。

4. 测量方法误差: 又称理论误差。它是指由于使用的方法不完善、理论依据不严密等原因导致的测量误差。

对于某一项具体的测量工作, 其测量误差来源要具体分析, 它牵涉到上述误差来源的全部或部分内容。误差的大小和主次程度也应具体分析确定。

三、测量误差的分类

按测量误差的性质及产生的原因, 测量误差可分为三类。

1. 系统误差

在相同条件下多次测量同一量时, 误差的绝对值和符号保持恒定, 或在条件改变时按某种确定的规律变化的误差称为系统误差。

例如仪器零点未调整好, 测量结果随温度的变化而变化等等。

系统误差一般可用标准仪器进行校准, 使它对测量结果的影响小到忽略不计; 不便进行校正的仪器, 也可求出它的修正值对测得的结果进行修正; 或者改变测量条件、改进方法, 使系统误差减少或消除。

2. 随机误差

在相同条件下测量同一量时, 误差的绝对值和符号以不可预定的方式变化着的误差称为随机误差。

随机误差是由上述四类误差来源中各种因素随机微小变化所引起的, 可以认为是多种偶然因素造成的, 故有些书上称它为偶然误差。

随机误差对一次测量而言, 表现出无规律, 不可预定, 不可控制。但就多次测量而言, 它

的变化服从统计规律。对一个量测量足够多的次数，如 1000 次，就能明显地看出如下规律
误差的绝对值不会超过某一界限（有界性）；

正负误差出现的机会相同（对称性）；

随机误差的算术平均值随着测量次数 n 的无限增加而趋近于零（抵偿性）；

小误差出现的机会比大误差多，随机误差的分布形式接近于正态分布。

根据这些性质，我们可以通过对一个量进行多次测量，取其算术平均值作为最终结果，该结果中随机误差的影响较小。

3. 粗差（疏失误差）

在相同条件下重复测量同一量时，明显地歪曲了测量结果的误差称为粗差。含有粗差的测量值称为坏值或异常值。

粗差产生于人的错误操作，仪器的不稳定以至故障或是外界条件如电网电压的突变、接插件接触不良等因素的影响。

粗差出现后，应认真分析产生原因，改进测量。对测量中出现的粗差应根据统计检验的某种法则去科学地判断出来，予以剔除。

有时出现异常值而又找不出明显的原因时，不可随意剔除它，而应考虑仪器可能有故障，仪器应予检修和校正。甚至还可能存在尚未认识的某种现象，等待发现。

总之，测量结果中对三类不同性质的误差要用不同的方法处理。除粗差外，系统误差与偶然误差大多同时存在于测量结果中，如果经过分析，发现系统误差大于偶然误差，按系统误差处理方式处理，如加修正值等；反之按偶然误差处理方式处理；两者影响接近时，要分别进行误差处理。处理方法详见教材^①

四、测量结果的评定

常用正确度、精密度和精确度来评定测量结果，它们的意义如下：

1. 正确度

正确度指测量值与真值的接近程度。反映系统误差的影响，系统误差小则正确度好。

2. 精密度（简称精度^②）

精密度指测量值相互之间接近的程度。精密度反映随机误差的影响，随机误差小则精度高。

3. 精确度（或称准确度）

精确度反映系统误差与随机误差综合影响的程度。是精密度与正确度的综合反映。精确度高反映测量结果既精密又正确。

图（1-3-1）表示了一系列测量值与真值 X_0 的关系，（测量值以短画标记）说明测量的精确度在三种情况下是不相同的。

以上仅从概念上说明可以用精密度、正确度和精确度来表示测量结果的好坏。实际工作中需要用数量来表示它们，以便比较仪器的好坏或比较测量结果的优劣。对某一个具体的测量结果，明确地给出它的误差到底是多少，这属于误差与数据处理问题。在本节中仅以以下的说明和测量实例简要介绍。

^① 蒋焕文、孙续《电子测量》中国计量出版社 1988.5。

^② 国家计量总局《中华人民共和国计量器具检定规程常用计量名词术语及定义》JJG1001—82（试行）。