

21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century



电气测量学

DIANQI CELIANGXUE

王月华 姜志宏 主 编
温克利 张维俊 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

21 世纪高等学校规划教材

Textbook Series of 21st Century



要 要 要 内

电气测量学

DIANQI CELIANGXUE

主 编 王月华 姜志宏
副主编 温克利 张维俊
编 写 周正峰
主 审 赵 伟



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书分为两篇,共十四章,主要内容包括:电气测量的一般知识,电流和电压的测量,电阻的测量和万用表,功率、功率因数和相位的测量,测量用互感器,感应系电能表的结构和工作原理,电能计量方式,电能表的误差特性及调整装置,电子式电能表,电子式电能表的检定,特种电能表,电能表检修,电能计量装置的接线检查和综合误差。本书在编写过程中尽量将最新电气测量、电能计量理论知识与工作实际结合起来,以满足目前与未来发展的需要。

本书可作为普通高等学校电气信息类等相关专业的教材,也可作为有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气测量学/王月华等主编. —北京:中国电力出版社, 2007

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-5998-4

I. 电… II. 王… III. 电气测量-高等学校-教材
IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 121944 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 10 月第一版 2007 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 400 千字

定价 26.60 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

随着我国改革开放的不断深入,电力管理更加科学完善,电气测量、电能计量更加精确。考虑到电气测量、电能计量在实际工作中的需要,本书根据教学大纲进行编写。在编写过程中,根据以往教学收集的资料及教学中发现的问题,将最新电气测量、电能计量理论知识与工作实际相结合,以满足目前与未来发展的需要。

全书共分为两篇,第一篇介绍电气测量仪表,第二篇介绍电能计量。

电气测量学是从事电气工程的技术人员必须掌握的基础知识,在现代信息社会占有重要地位。本书是为大学电类测量专业、非测量专业本科生,测量专业大专生编写的教材,主要叙述了各种常用电工仪表的工作原理、技术特性和使用方法,介绍了各种电量的主要测量方法和特点;介绍了万用表及电桥;介绍了感应系、电子式电能表的结构和工作原理;介绍了电能表的计量方式、误差特性及调整装置和特种电能表。本书在编写上依据国家标准统一了名词、术语、定义和单位。期望通过本书的学习,读者能够根据工作的需要,正确选择电工仪表并掌握正确的电气测量方法。

学习本课程,要求学生有高等数学、大学物理、电路、电子、计算机等方面的知识。

通过本课程的学习,能够使学生掌握基本的电气测量方法,电工仪表、电能表的工作原理及使用方法。

全书计划学时40~60学时,可根据具体情况和教学对象适当调整。全书分两篇共十四章,第一、二、三、四章由姜志宏编写,第五、十一章由张维俊编写,第六、七、八章由王月华编写,第九、十章由温克利编写,第十二、十三、十四章由周正峰编写;由王月华、姜志宏负责统稿。在本书的编写过程中,赵伟教授提出了宝贵的意见,佳木斯电力公司王野、长春电力公司高磊、潘英伟给予大力协助,并得到了郭松山老师的指导,在此一并致谢。

由于作者的知识水平所限,书中不足之处在所难免,欢迎读者批评、指正。

编者

2007年7月

目 录

前言

第一篇 电气测量

第一章 电气测量的一般知识	1
第一节 电气测量及误差	1
第二节 有效数字	7
第三节 电工仪表的表面标记和型号	9
第二章 电流和电压的测量	11
第一节 直流电压和电流的测量	11
第二节 交流电流和电压的测量	17
第三章 电阻的测量和万用表	22
第一节 电阻的伏安法测量	22
第二节 直流单臂电桥	23
第三节 直流双臂电桥	25
第四节 兆欧表	27
第五节 欧姆表	30
第六节 万用表	32
第四章 功率、功率因数和相位的测量	38
第一节 电动系测量机构	38
第二节 电动系功率表	39
第三节 低功率因数功率表简介	42
第四节 三相有功功率的测量	43
第五节 三相无功功率的测量	45
第六节 功率因数的间接测量	47
第七节 电动系比率表	48
第八节 单相电动系相位表	49
第五章 测量用互感器	53
第一节 电流互感器的原理与使用	53
第二节 电压互感器的原理与使用	66
第三节 特殊结构电压互感器原理	76
第四节 互感器的试验	77

第二篇 电能计量

第六章 感应系电能表的结构和工作原理	88
第一节 概述	88
第二节 单相电能表的结构	90
第三节 单相电能表的工作原理	96
第四节 三相电能表的结构	109
第七章 电能计量方式	111
第一节 有功电能的测量	111
第二节 无功电能的测量	118
第三节 三相有功和无功电能表的联合接线	129
第八章 电能表的误差特性及调整装置	131
第一节 电能表的负载特性曲线	131
第二节 外界因素对电能表的影响	141
第三节 误差调整装置	156
第九章 电子式电能表	167
第一节 电子式电能表的基本知识	167
第二节 电子式电能表的原理和结构	169
第三节 电子式电能表的多种功能	172
第四节 电子式电能表的接线	176
第十章 电子式电能表的检定	180
第一节 电能表检定装置	180
第二节 电子式电能表的检验	186
第三节 电子式电能表特殊功能的检验	189
第四节 电能表的现场检验	194
第十一章 特种电能表	198
第一节 感应式标准电能表	198
第二节 损耗电能表	200
第三节 最大需量电能表	205
第四节 多路最大综合需量电能表	209
第五节 电力定量器	210
第六节 分时计费电能表	217
第十二章 电能表检修	218
第一节 电能表外部检修	218
第二节 电能表内部检修	219
第三节 电能表的装配	223
第四节 电能表的量限	224
第五节 检修电能表的常用设备	226

第十三章	电能计量装置的接线检查	230
第一节	不带电检查互感器的接线	230
第二节	带电检查互感器的接线	232
第三节	带电检查电能表和互感器的联合接线	237
第四节	追退电量的计算方法	242
第十四章	电能计量装置的综合误差	244
第一节	误差理论	244
第二节	电能计量装置的综合误差	246
第三节	校验装置的综合误差	252
第四节	减小综合误差的方法	253
参考文献		256

第一篇 电气测量

第一章 电气测量的一般知识

第一节 电气测量及误差

所谓测量,简单地说就是确定被测量的数值。测量的过程通常是将被测量与其单位量进行比较,以确定它是测量单位的多少倍或多少分之一。电气测量就是将被测量与其单位量进行比较,以确定其大小的过程。

一、电气测量方式及分类

电气测量按测量方式可分为如下两类:

(1) 直接测量。由所用测量仪器仪表直接测得被测量数值,称为直接测量。如用电流表测电流,用电桥测电阻等。

(2) 间接测量。先测出与被测量有关的几个中间量,然后通过计算再求得被测量的数值,称为间接测量。例如,用伏安法测量电阻就是先测出电阻两端的电压和通过的电流,然后再根据欧姆定律计算出电阻值。

电气测量按测量方法可分为如下两类:

(1) 直读法。使用电工测量指示仪表,在测量时通过仪表指针的偏转直接读取被测量数值,称直读法。各种电流表、电压表、功率表和万用表均为电工测量直读式指示仪表。这种测量简便、快速,但由于仪表本身的误差等因素会造成测量误差。

(2) 比较法。将被测量与标准量在比较式仪表内进行比较,从而得知被测量数值,称比较法。各种直、交流电桥均为比较式仪表。这种测量方法的准确度高,但操作比较麻烦。

电气测量方法多种多样,对某一被测量的测量,常不限于采用一种方法。例如,测量电阻值有伏安法、电桥法,也可用万用表来测量。每一种方法都有其优点和缺点,需要根据具体条件,采用合适的仪器仪表和合适的方法来进行测量。进行的任何测量都希望获得被测量的真实数值,真实数值简称为“真值”。不过,所有的仪器仪表都不能实现绝对理想的测量,因而得到的并不是被测量的真值,而是近似值。仪表的指示值与真值之间的差异,称为仪表的误差。仪表误差的大小反映了仪表的准确程度。

二、仪表的误差

(一) 仪表误差的分类

根据产生误差的原因,仪表的误差分为两类。

1. 基本误差

基本误差是指仪表在正常工作条件下,由于制造工艺限制,仪表本身所固有的误差。如标尺刻度不准、轴尖与轴承之间发生摩擦、内部磁场改变和安装不正确等原因,均会造成此

类误差。

2. 附加误差

附加误差是指仪表在非正常工作条件下进行测量时产生的误差。如环境温度、外界电磁场、频率、波形等发生变化及安放位置不符合要求时，均会引起此类误差。

(二) 误差的几种表示形式

1. 绝对误差

测量值（仪表的指示值、仪表的读数） A_x 与被测量的真值 A_0 之间的差值称为绝对误差，用符号 Δ 表示，即

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-1)$$

由于被测量的真值 A_0 是不知道的，所以用标准表（用来检定工作仪表的高准确度仪表）测得的值 A 来代替 A_0 。这样，绝对误差便定义为

$$\Delta = A_x - A$$

式中 A ——标准表的指示值，称为实际值。

绝对误差有正、负之分，测量值大于实际值时为正，小于实际值时为负。绝对误差的单位与被测量的单位相同。应该注意，不要把误差的绝对值与绝对误差混为一谈。

绝对误差比较直观，但只有当几个被测量的数值相等或接近相等时，它才能正确评定测量的准确度。

例 1-1 电压表甲在测量实际值为 100V 的电压时，测量值为 101V；电压表乙在测量实际值为 1000V 的电压时，测量值为 998V。求两表的绝对误差。

解：甲表的绝对误差为

$$\Delta_{\text{甲}} = 101 - 100 = 1 \text{ (V)}$$

乙表的绝对误差为

$$\Delta_{\text{乙}} = 998 - 1000 = -2 \text{ (V)}$$

$|\Delta_{\text{甲}}| < |\Delta_{\text{乙}}|$ ，但如果认为甲表比乙表准确度高，显然是错误的。在这种情况下，应采用相对误差来进行评定。

2. 相对误差

绝对误差 Δ 与实际值 A 的比值称为相对误差，它是一个无量纲的数值，用符号 γ 表示。在测量学中，相对误差常用分子为 1 的分数来表示，如 $\frac{1}{100}$ 、 $\frac{1}{500}$ 等。在电气测量中，通常以百分数表示相对误差，即

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{实际值}} \times 100\%$$

用符号表示为

$$\gamma = \frac{\Delta}{A} \times 100\% \quad (1-2)$$

在例 1-1 中，甲、乙两电压表的相对误差分别为

$$\gamma_{\text{甲}} = \frac{1}{100} \times 100\% = 1\%$$

$$\gamma_{\text{乙}} = \frac{-2}{1000} \times 100\% = -0.2\%$$

显然,后者较前者的准确程度高。可见,相对误差表明了误差对测量结果的相对影响,给出了误差的清晰概念。由于相对误差可以对不同测量结果的误差进行比较,所以它是误差计算中最常用的一种表示方法,工程上凡需确定测量结果的误差或估计测量结果的准确度时,一般都是计算相对误差。

由于被测量的实际值 A 和测量值 A_x 相差不大,所以工程上也常用测量值 A_x 代替 A 进行计算,则相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\%$$

3. 引用误差

相对误差可以表示测量结果的准确程度,却不能用来说明仪表本身的准确性能。一只仪表在其测量范围内,各刻度处的绝对误差 Δ 相差不大,因而相对误差就随着测量值的减小而增大。例如,用一只 $0 \sim 250\text{V}$ 电压表测量 200V 电压时,绝对误差 $\Delta = 2\text{V}$,其相对误差为

$$\gamma = \frac{2}{200} \times 100\% = 1\%$$

在测量 10V 电压时,绝对误差 $\Delta = 1.9\text{V}$,其相对误差为

$$\gamma = \frac{1.9}{10} \times 100\% = 19\%$$

因而相对误差在仪表的全量限上变化很大,任取哪一个 γ 值来表示仪表的准确度都不合适。

如果把相对误差 γ 计算公式中的分母换用仪表的最大刻度值(即上量限),则比值就接近于一个常数,解决了表示同一只仪表的相对误差变化太大的问题。绝对误差 Δ 与仪表最大刻度值 A_m 之比的百分数称为引用误差或满刻度相对误差,记为 γ_n ,即

$$\gamma_n = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (1-3)$$

引用误差虽然也是一种相对误差,但它是用绝对误差与一个常数的比值来表示的,故实际上反映了同量限仪表的绝对误差的大小。只有当仪表的读数接近其量限时,引用误差才反映测量结果的相对误差。

根据我国国家标准规定,引用误差用来表示电工测量仪表的基本误差。

仪表各刻度处的绝对误差不一定相等,其值有大、有小,符号有正、有负,其中,最大绝对误差 Δ_m 与仪表的最大刻度值 A_m 之比的百分数称为最大引用误差,记为 γ_{mm} ,即

$$\gamma_{mm} = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \quad (1-4)$$

一只合格的仪表,在规定的正常工作条件下,其最大的引用误差的绝对值应小于其允许的数值。

(三) 修正值

在实际测量中,常采用加入修正值的方法来提高测量结果的准确程度。

绝对值与 Δ 相等,而符号相反的值称为修正值,用符号 C 表示,即

$$C = -\Delta \quad (1-5)$$

也就是 修正值 = -绝对误差

故实际值=测量值-绝对误差=测量值+修正值
即 $A=A_x+C$

例 1-2 一电压表在 50V 刻度点的 $\Delta=0.04V$ ，求该刻度的修正值和实际值。

解：
 $C=-\Delta=-0.04(V)$
 $U=U_x+C=50+(-0.04)=49.96(V)$

三、仪表的准确度（精确度）

（一）准确度

准确度的高、低是用误差来衡量的。误差越小，准确度越高；误差越大，准确度越低。

准确度包含精密度和正确度两方面的内容，其中精密度是指多次重复测量某一值时，测量数据的一致程度。以射击为例，靶心相当于测量真值，而着弹点相当于测量值，准确的射击好比准确的测量。图 1-1 (a) 虽不命中，正确度差，但着弹点密集，表示精密度高；图 1-1 (b) 着弹点分散，精密度低，但正确度比图 1-1 (a) 的高。可见，精密度和正确度是有区别的。正确度和精密度都高是有可能的，如图 1-1 (c) 所示，着弹点都集中在靶心。

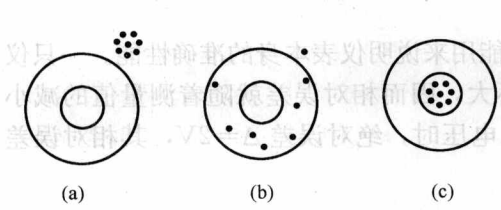


图 1-1 精密度与正确度比较示意图
(a) 精密度高；(b) 精密度低；
(c) 精密度与正确度都高

点都集中在靶心。

测量结果的精密度高，不一定正确度就高。反之，正确度高，精密度不一定也高。不够精密或不够正确的程度超过一定的范围，测量结果就没有意义了。精密度和正确度都高，称为精确度（取前者之“精”，取后者之“确”）高或准确度高。

（二）仪表的准确度等级

仪表的准确度等级是表明仪表质量的主要标志，用来反映仪表的基本误差。

仪表的准确度等级是按国家标准 GB 776 《电测量指示仪表通用技术条件》规定的允许误差大小而划分的。根据国家标准规定仪表的准确度等级共分 7 级：0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 级。在各级仪表标尺工作部分的所有分度线上，其基本误差不允许超过仪表准确度等级的数值，如表 1-1 所示。

表 1-1 基本误差与仪表准确度等级的关系

仪表的准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差不大于 (%)	±0.1	±0.2	±0.5	±1.0	±1.5	±2.5	±5.0

若以 K 表示仪表的准确度等级，则 K 与最大引用误差的关系是

$$K\% \geq \frac{|\Delta_m|}{A_m} \times 100\% \tag{1-6}$$

K 值表示仪表在规定工作条件下所允许具有的最大误差。例如，准确度等级 $K=0.5$ 的仪表，在规定工作条件下，其最大引用误差不允许超过 $\pm 0.5\%$ 。仪表的准确度等级的数值越小，允许的最大引用误差的绝对值就越小，表示仪表的准确度越高。通常，0.1、0.2 级仪表用作标准表；0.5、1.0、1.5 级仪表用于实验室；1.5、2.5、5.0 级仪表用于配电盘。我国颁发的《电力工业技术管理法规》中规定：用于发电机及其重要设备的交流仪表的准确

度等级应该不低于 1.5 级；用于其他设备和线路上的交流仪表应不低于 2.5 级，直流仪表应不低于 1.5 级。对于电力系统中的调度所和发电厂，为了准确监视系统的频率，宜采用数字式和记录式频率表，其测量范围在 45~55Hz 时的基本误差应小于 $\pm 0.02\text{Hz}$ 。为了准确地监视系统电压，在电压监视点上应装设记录式电压表。

仪表一般都在运行现场使用，有些场合是很难满足规定的技术条件的，此时带来的仪表的附加误差在 GB 776 中有相应规定。如 A 组 1.5 级指示仪表的正常工作温度为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ，温度每偏离 10°C ，所引起的附加误差用最大引用误差表示，也是 $\pm 1.5\%$ 。

例 1-3 校验一只量程为 300V 的电压表时，发现 100V 处的误差最大，其值 $\Delta_m = -2\text{V}$ ，求该表的准确度等级。

解：
$$\frac{|\Delta_m|}{A_m} \times 100\% = \frac{2}{300} \times 100\% = 0.67\%$$

准确度等级 K 为 1.0 级。

例 1-4 用量限为 5A、准确度等级为 0.5 级的电流表来测量 5A 和 2.5A 的电流，求测量结果可能出现的最大相对误差。

解：可能出现的最大绝对误差为

$$\Delta_m = \pm K\% \times A_m = \pm 0.5\% \times 5 = \pm 0.025 \text{ (A)}$$

测量 5A 电流时，可能出现的最大相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta_m}{A} \times 100\% = \frac{\pm 0.025}{5} \times 100\% = \pm 0.5\%$$

测量 2.5A 电流时，可能出现的最大相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta_m}{A} \times 100\% = \frac{\pm 0.025}{2.5} \times 100\% = \pm 1.0\%$$

应该指出，仪表的准确度等级是反映仪表性能的主要指标，但由例 1-3 和例 1-4 可知，使用仪表进行测量时，它所产生的相对误差可能会超过其准确度等级的允许误差，被测量越小，相对误差就越大。所以，不能把仪表的准确度等级看成是测量结果的准确度。对于准确度等级为 0.5 级的仪表，其测量结果的相对误差通常会大于 $\pm 0.5\%$ 。只有当被测量与仪表的满度值相等时，测量结果的相对误差才不大于仪表准确度等级所允许的误差。

例 1-5 要测量 220V 的电压，现有两只电压表：

(1) 量限 500V，1.0 级；

(2) 量限 250V，1.5 级。

试问用哪只表测量较为准确？

解：两表可能出现的最大绝对误差和相对误差分别为

$$(1) \quad \Delta_m = \pm K\% \times A_m = \pm 1.0\% \times 500 = \pm 5.0 \text{ (V)}$$

$$\gamma = \frac{\pm \Delta_m}{A} \times 100\% = \frac{\pm 5.0}{220} \times 100\% = \pm 2.3\%$$

$$(2) \quad \Delta_m = \pm K\% \times A_m = \pm 1.5\% \times 250 = \pm 3.75 \approx \pm 3.8 \text{ (V)}$$

$$\gamma = \frac{\pm \Delta_m}{A} \times 100\% = \frac{\pm 3.8}{220} \times 100\% = \pm 1.7\%$$

故用 250V，1.5 级的电压表较为准确。

由例 1-5 可知，并不是仪表“越高级越好”，仪表的准确度高，一般来说误差会小，但

仪表的量限大了会增大误差。这好比秤小东西要用小秤或天平，而不能用大秤来称一样，否则可能无法称或称不准。因而选用仪表要考虑合适的量限。为了保证测量结果的准确度，仪表的量限应尽量接近被测量，通常被测量应大于仪表量限的 1/2。在运行现场，应尽量保证发电机、变压器及其他电力设备在正常运行时，仪表指示在标度尺量限的 2/3 以上，并应考虑过负载时能有适当指示。

四、测量误差

(一) 测量误差

测量误差是指测量结果与被测量的实际值之间的差异。它除了包括仪表误差外，还包括因测量方法、外界环境和操作技术等因素带来的误差。

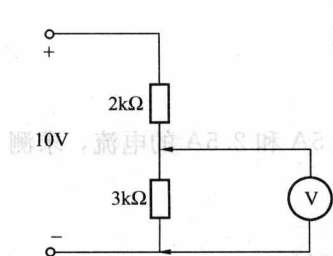


图 1-2 测量方法的影响

测量方法误差是由于仪表接入电路后改变了电路的状态，或测量方法依据的是某个近似公式时造成的误差。如图 1-2 所示的电路，3kΩ 电阻两端的电压应为 6V，当接入内阻 $R_v = 6k\Omega$ 的电压表时，测量所得却为 5V。这时，绝对误差 $\Delta = 5 - 6 = -1$ (V)，相对误差 $\gamma = \frac{-1}{6} \times 100\% = -16.7\%$ ，这就是测试方法的影响而造成的误差。

(二) 测量误差的分类

根据测量误差的性质，可将测量误差分为系统误差、随机误差和疏失误差 3 类。了解它们的特点和来源，便于消除或减少对测量结果的影响。

1. 系统误差

凡数值固定或遵循一定规律变化的误差称为系统误差。系统误差可以通过实验或理论计算来求得。系统误差有以下几种来源：

- (1) 仪表本身的“固有误差”，也即基本误差。各种准确度等级的仪表均有一定的容许误差。准确度等级高的，容许误差小；准确度等级低的，容许误差大。
- (2) 仪表的“使用误差”，也即附加误差。
- (3) 测量方法的误差。
- (4) 由于各人的感官差异和习惯偏向造成的误差。

系统误差应该控制在容许范围内，如果超出了容许范围就应该设法补偿修正。通常，系统误差可以通过与高一级的基准进行对比而得到校正。

2. 随机误差

随机误差又称偶然误差，其特点是在多次测量同一量时，误差的大小和符号均发生不可预知的变化。这种误差是由于各种随机因素（温度的微量变化、空气的扰动、地面的微震、电源电压波动、电磁场微变等）对测量产生的综合影响。

由于随机误差没有规律性，不为测量者所预知，也无法加以控制，所以随机误差不能用实验方法加以修正。对这种误差，可通过获取大量测定值后求取平均值来使之减少。在消除随机误差之后，这种平均值比较接近实际值。因而，常以平均值作为测量结果。

3. 疏失误差

由于测量人员的疏忽而造成的误差称为疏失误差。如仪器操作不正确、读错、记错或算错而带来的误差。这种误差的数值可能远大于随机误差或随机误差。严格地说，它不属于误

差的范畴,而是不懂测量或粗心大意而造成的错误。

含有疏失误差的测量值称为坏值,应予废弃。

第二节 有效数字

一、有效数字的概念

测量值一般都包含有误差,所以测量值是近似值。近似值的数字应取多少位,这是应该弄清楚的。如图 1-3 所示的 0~50V 量限的电压表,电压表指针在位置 1 的读数为 8.5V,其中小数点后的“5”是估读的(欠准的);指针在位置 2 时,正指在 25V 处,应记为 25.0V;指针在位置 3 时,正指在 40V 处,应记为 40.0V。如果该表量限为 5V,则各量应记为 0.85、2.50V 和 4.00V。这种仪表的测量值最多只能写成 3 位数,如果多于 3 位数,3 位数后的数字就无意义了。

从一个数据的左边第一个非零数字算起至后面含有误差的一位止,其间所有数码均为有效数字。有效数字的位数称为有效位数,有效位数越多,误差越小。例如 $\pi=3.14159\cdots$, 在计算中可取:

$$\pi=3.142, 4 \text{ 位有效数};$$

$$\pi=3.1416, 5 \text{ 位有效数}.$$

可见,有效位数表征着近似值的准确程度。

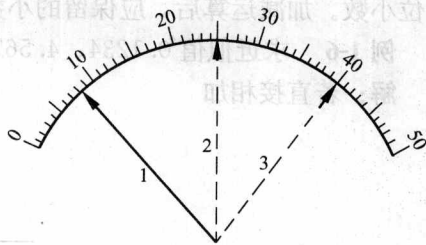


图 1-3 仪表有效数字的估读

在数学中, 1.1 和 1.10 是相等而没有区别的,

但作为测量数据,二者是有区别的。前者表示误差出现在小数点后第一位,而后者表示误差出现在小数点后第二位,因此,后者比前者要精确。“0”这个数字在数字中间或在数尾时,是有效数字,如 101、200、2.30 等。在小数点后的数尾不能随便增加或减少零。但当“0”在第一个非零数字之前时,就不是有效数字,如 0.023 中第一个和第二个“0”都不是有效数字,因为 0.023m 可以写成 $23\times 10^{-3}\text{m}=23\text{mm}$,也可写成 $23\times 10^{-6}\text{km}$,采用不同乘幂仅改变单位,而不改变准确度,故此数的有效位数为 2。有些数值为准确值,是不带误差的,如公式 $\omega=2\pi f$ 和 $W=\frac{1}{2}LI^2$ 中的 2 和 $\frac{1}{2}$,它们的有效位数应为无穷多位。

为了保证测量仪器的准确度,其指示机构必须使读数有足够的位数,位数少会增加仪器的测量误差,位数太多又没有必要。如数字式电压表的误差为万分之几,就应设计 5 位读数;若仅有 4 位读数,则误差达千分之几,若设计 6 位读数,则第六位表示整个读数的十万分之几,比总误差还小,所以这一读数已无意义。

二、数据的舍入规则

通常,对测量或计算所得数据要进行舍入处理,以使它具有所需的位数,这个处理工作叫“修约”。修约的规则如下。

若选定有效位数为 n ,则第 $n+1$ 位后的多余数字按下列规则舍入:

(1) 当第 $n+1$ 位数字大于 5 时则入,如 $e=2.71828$,取 3 位为 $e=2.72$ 。

(2) 当第 $n+1$ 位数字小于 5 时则舍,如 $e=2.71828$,取 4 位为 $e=2.718$ 。

(3) 当第 $n+1$ 位数字恰好等于 5 时应使用“偶数原则”:若第 n 位为奇数,则进 1,如 1123.45,取 5 位为 1123.5;若第 n 位为偶数,则舍去,如 123.45,取 4 位为 123.4。总之,要使末位凑成偶数。这与“四舍五入”的一般规则不同,逢 5 就入会在大量的数字运算中造成累积误差,而根据末位的奇偶数来决定入或舍,可使入与舍的机会相等,提高了数据的准确度。

(4) 若需要舍去的尾数为两位以上的数字时,不得进行连续修约,而是应该根据准备舍去的数字中左边第一个数字的大小,按上述规则一次修约出结果。如 12.346 需要修约成 3 位数时,应为 12.3,而不是先修约成 12.35,再修约成 12.4。

三、有效数字的运算规则

1. 加减运算

(1) 小数位数相同时,其和、差的有效数的小数位与原来的相同,如 $12.34 + 56.78 = 69.12$ 。

(2) 小数位数不同时,应对小数位数多的先进行舍入处理,使它仅比小数位数最少的多一位小数。加减运算后,应保留的小数位数与原来近似值中最少的小数位数相同。

例 1-6 求近似值 0.1234、4.567、78.9 之和。

解: 若直接相加

$$\begin{array}{r} 0.1234 \\ 4.567 \\ +) 78.9 \\ \hline \end{array}$$

83.5904

其和为 83.5904,但第三个近似值中的第三位数 9 是欠准的,故和数的尾数 0.0904 已无实际意义而应略去,和数应取 83.6。可见,此尾数的计算是多余的。实际计算时,为了简便,可对小数位数较多的近似值先进行舍入,使它们只比小数位最少的多一位,如

$$\begin{array}{ll} 0.1234 & \text{取为 } 0.12 \\ 4.567 & \text{取为 } 4.57 \end{array}$$

再与 78.9 相加,得

$$\begin{array}{r} 0.12 \\ 4.57 \\ +) 78.9 \\ \hline \end{array}$$

83.59

然后,再取舍为 83.6,使其小数位数与最少的小数位数相同。

2. 乘、除运算

两个近似值相乘或相除时,有如下要求:

(1) 先对有效位数多的近似值进行修约,使它比有效位数最少的近似值只多一位有效数字。

(2) 计算结果应保留的有效位数与原近似值中有效位数最少的那个数相同。

例 1-7 求 $0.12 \times 34.5 \times 6.789$ 。

解: 有效位数最少的是 0.12,为两位数,故应将 6.789 修约为 3 位,即 6.79,然后计算

$$0.12 \times 34.5 \times 6.79 = 28.1106$$

应保留两位数，故取 28。

3. 平均值

对于多次重复测量的数据，其平均值应与单次测量数据的有效数字的位数一样。

第三节 电工仪表的表面标记和型号

一、电工仪表的表面标记

仪表的表面有各种标记符号，以表明它的基本技术特性。根据国家规定，每一只仪表应有测量对象的电流种类、单位、工作原理的系列、准确度等级、工作位置、外界条件、绝缘强度、仪表型号以及额定值等标志。表 1-2 给出了电工仪表常见的表面标记符号。

表 1-2 电工仪表常见的表面标记符号

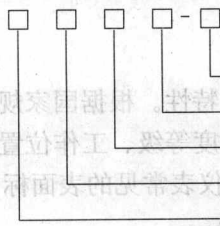
分类	符 号	名 称	分类	符 号	名 称
电 流 种 类	—	直 流	工 作 位 置		标尺位置垂直
	~	交 流			标尺位置水平
	≈	直流和交流			标尺位置与水平面成 60°角
	≈	三相交流	外 界 条 件		I 级防外磁场（例如磁电系）
测 量 单 位	A	安			I 级防外电场（例如静电系）
	V	伏			II 级防外磁场及电场
	W	瓦			III 级防外磁场及电场
	var	乏			IV 级防外磁场及电场
	Hz	赫			A 组仪表
工 作 原 理		磁电系仪表			B 组仪表
		电磁系仪表			C 组仪表
		电动系仪表	绝 缘 强 度		不进行绝缘强度试验
		磁电系比率表			绝缘强度试验电压为 2kV
		铁磁电动系		+	正 端 钮
		整流系仪表	端 钮	-	负 端 钮
准 确 度 等 级	1.5	以表尺量限的百分数表示		*	公共端钮
		以指示值的百分数表示			

二、型号

电工仪表的产品型号按有关规定的标准编制。开关板式与携带式仪表的型号编制是不同的。

1. 开关板式仪表的型号组成

开关板式仪表的型号组成如下：



形状第一位代号按仪表的面板形状最大尺寸编制。

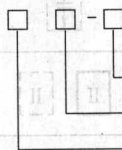
形状第二位代号按仪表的外壳形状尺寸特征编制。

系列代号按仪表的工作原理编制，如“C”表示磁电系，“T”表示电磁系，“D”表示电动系，“G”表示感应系，“L”表示整流系。

例如，44C7-kA 型电流表，其中“44”为形状代号，可由产品目录查得其正面尺寸和安装开孔尺寸；“C”表示磁电系仪表；“7”为设计序号；“kA”表示用于电流测量。

2. 携带式仪表的型号组成

携带式仪表的型号组成如下：



例如，T 21-V 型电压表，其中“T”表示电磁系仪表，“21”为设计序列，“V”表示用于电压测量。

电工仪表的型号标明在仪表的表盘上。

表头A		电压表	表头A
表头B		电压表	表头B
表头C		电压表	表头C
表头D		电压表	表头D
表头E		电压表	表头E
表头F		电压表	表头F
表头G		电压表	表头G
表头H		电压表	表头H
表头I		电压表	表头I
表头J		电压表	表头J
表头K		电压表	表头K
表头L		电压表	表头L
表头M		电压表	表头M
表头N		电压表	表头N
表头O		电压表	表头O
表头P		电压表	表头P
表头Q		电压表	表头Q
表头R		电压表	表头R
表头S		电压表	表头S
表头T		电压表	表头T
表头U		电压表	表头U
表头V		电压表	表头V
表头W		电压表	表头W
表头X		电压表	表头X
表头Y		电压表	表头Y
表头Z		电压表	表头Z