

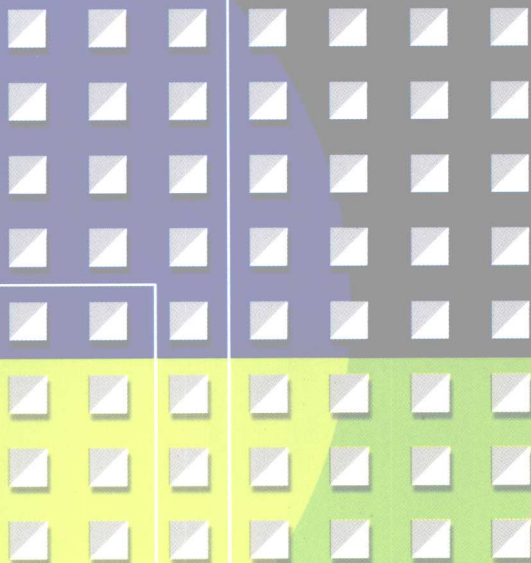


高等学校“十一五”精品规划教材

电工仪表及测量

主编 周启龙

DIANGONG YIBIAO JI CELIANG



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校“十一五”精品规划教材

电工仪表及测量

主 编 周启龙

副主编 钱珊珠 陈 丽 杨 薇



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要包括测量的基础知识、磁电系仪表、电磁系仪表、电动系仪表及功率测量、感应型仪表和电能测量、仪表的选择和校验、数字式仪表的基本知识。

本书适合于各类电气专业的在校学生学习使用,也可以作为从事电气测量工作的工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电工仪表及测量 / 周启龙主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2008

高等学校“十一五”精品规划教材

ISBN 978-7-5084-5774-1

I. 电… II. 周… III. ①电工仪表—高等学校—教材
②电气测量—高等学校—教材 IV: TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 111096 号

书 名	高等学校“十一五”精品规划教材 电工仪表及测量
作 者	主编 周启龙
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本: 9.5 印张 225 千字
版 次	2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	19.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

本教材是“高等学校‘十一五’精品规划教材”之一，是根据全国教学指导委员会指定的教学大纲的要求而编写的。适用于各类电气专业的学生，也可作为从事电气测量工作的工程技术人员的参考书。

教材中比较详细地介绍了测量的基本知识，测量误差的基本概念，电气仪表的基本知识，目前电气测量中常用的模拟型仪表的基本结构和基本原理，主要包括：磁电系仪表、电磁系仪表、电动系仪表，感应型电能表，应用这些仪表测量相关电气测量的原理电路。并介绍了仪表的选择方式和各种仪表的校验方法，数字式仪表的基本知识和常用数字仪表的原理电路。编写过程中注重理论联系实际、注重实际应用仪表和实际应用电路，深入浅出，便于自学。

参加编写的院校有沈阳农业大学，河北农业大学，内蒙古农业大学，山西农业大学。编写人员有周启龙、钱珊珠、陈丽、杨薇、吴仕宏、刘恒赤、王义明。全书由周启龙教授任主编，由朴在林教授主审。

由于水平有限，书中难免有疏漏和不足，恳请广大读者批评指正，同时对参考书的作者表示感谢。

作 者

2008年7月

目 录

前 言

第一章 测量与电工仪表的基本知识	1
第一节 测量基本知识	1
第二节 电工仪表的种类	2
第三节 电测量指示仪表的组成和基本原理	3
第四节 电测量指示仪表的误差和准确度	5
第五节 电测量指示仪表的主要技术性能	8
第六节 测量误差及其消除方法	9
第七节 工程上最大测量误差的估计	11
第八节 电工仪表的表面标记和型号	14
思考题	16
第二章 磁电系仪表	18
第一节 磁电系仪表的测量机构及工作原理	18
第二节 磁电系电流表	20
第三节 磁电系电压表	25
第四节 万用电表	26
思考题	30
第三章 电磁系仪表	32
第一节 电磁系仪表的结构和工作原理	32
第二节 电磁系电流表和电压表	36
第三节 电磁系仪表的误差及防御措施	38
第四节 电磁系仪表的常见故障及其消除方法	39
第四章 电动系仪表	40
第一节 电动系测量机构	40
第二节 电动系电流表和电压表	42
第三节 电动系功率表	43
第四节 三相交流电路中有功功率的测量	49
第五节 三相交流电路中无功功率的测量	51
思考题	53
第五章 电能计量	54
第一节 感应型电能表的结构和工作原理	54
第二节 电能表的调整	60
第三节 外界因素对电能表的影响	65

第四节	无功电能计量	68
第五节	仪用互感器	73
第六节	有功电能表的正确接线	77
第七节	电能表的错误接线	82
思考题		85
第六章	电测量指示仪表的选择与校验	87
第一节	电测量指示仪表的技术特性比较	87
第二节	电测量指示仪表的选择	88
第三节	电流表和电压表的校验	92
第四节	功率表和电能表的校验	95
思考题		106
第七章	其他仪表	107
第一节	电流电位差计	107
第二节	兆欧表和接地电阻测量仪	109
第三节	直流电桥和交流变比电桥	112
第八章	常用数字仪表	117
第一节	概述	117
第二节	数字式万用表	117
第三节	数字功率表	131
第四节	数字式电能表	136
第五节	智能型数字电能表	138
思考题		142
参考文献		143

第一章 测量与电工仪表的基本知识

电力工业的主要产品是电能，电能这种特殊的产品是人们的感觉器官所不能直接感觉和反映的。在电能的生产、传输、分配和使用等各个环节中，只有通过各种仪表的测量才能对系统的运行状态（如电能质量、负荷情况等）加以监视，才能保证系统安全和经济的运行。所以人们常常把电工仪表和测量叫做电力工业的眼睛和脉搏。电工仪表和测量技术是从事电气工作的技术人员必须掌握的一门学科。因为，在电气设备的安装、调试、试验、运行、维修，以及对电气产品进行检验、测试、鉴定中都会遇到这方面的技术问题。

第一节 测量基本知识

一、测量的定义

所谓测量，是指用实验的方法，将被测量（未知量）与已知的标准量进行比较，以得到被测量的具体数值，达到对被测量定量认识的过程。

电工测量，是指把被测的电量或磁量直接或间接地与作为测量单位的同类物理量（或者可以推算出被测量的异类物理量）进行比较的过程。

在测量过程中实际使用的已知量是被测量所用测量单位的复制体，称作度量器。度量器可以是测量单位本身，也可以是测量单位的分数倍或整数倍。

二、测量方式分类

1. 直接测量

直接测量指的是被测量与度量器直接进行比较，或者采用事先刻好刻度数的仪器进行测量，从而在测量过程中直接求出被测量的数值，这种方式称为直接测量。这种方式的特点是测出的数值就是被测量本身的值，例如用电流表测量电流，用电桥测量电阻等。这种方法简便迅速，但它的准确程度受所用仪表误差的限制。

2. 间接测量

如果被测量不便于直接测定，或直接测量该被测量的仪器不够准确，那么就可以利用被测量与某种中间量之间的函数关系，先测出中间量，然后通过计算公式，算出被测量的值，这种方式称为间接测量。例如用伏安法测电阻，就是利用测出电压与电流的值，然后利用欧姆定律间接算出电阻的值。

3. 组合测量

如果被测量有多个，虽然被测量（未知量）与某种中间量存在一定函数关系，但由于函数式有多个未知量，对中间量的一次测量是不可能求得被测量的值。这时可以通过改变测量条件来获得某些可测量的不同组合，然后测出这些组合的数值，解联立方程求出未知的被测量。例如，要测量电阻温度系数 α 和 β ，可以分别测出温度为 20°C 、 θ_1 和 θ_2 时的电阻值 R_{20} 、 R_{θ_1} 和 R_{θ_2} ，列出下列方程组，即

$$R_{01} = R_{20} [1 + \alpha(\theta_1 - 20) + \beta(\theta_1 - 20)^2] \quad (1-1)$$

$$R_{02} = R_{20} [1 + \alpha(\theta_2 - 20) + \beta(\theta_2 - 20)^2] \quad (1-2)$$

求解联立方程，从而求得 α 、 β 的值。

4. 比较测量

比较法是指被测量与已知的同类度量器在比较仪器上进行比较，从而求得被测量的一种方法。这种方法用于高准确度的测量，当然，为了保证测量的准确度，还要有较准确的比较仪器，要求保持较严格的实验条件，如温度、湿度、振动、防电磁干扰等，这种测量方法的特点是已知的同类度量器必须大于未知的被测量。根据比较时的具体特点、比较法又分为三种：

(1) 零值法。被测量与已知量进行比较，使两者之间的差值为零，这种方法称为零值法。例如用电桥测电阻，当被测电阻与已知电阻满足公式 $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0$ ，这时指零仪读数为零。被测电阻值即可按 R_1 、 R_2 、 R_0 三个值求得。具体电路见图 1-1。由于电测量指示仪表只用于指零，所以仪表误差不影响测量准确度。测量准确度只取决于已知电阻和指示仪表的灵敏度。使用天平测重量也是零值法的例子。

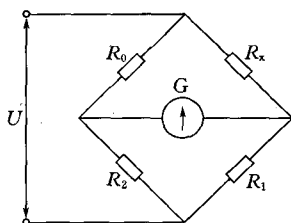


图 1-1 零值法测电阻

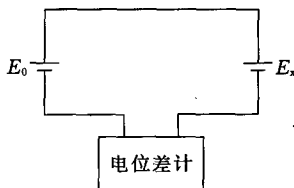


图 1-2 差值法测电势

(2) 差值法。差值法是通过测量已知量与被测量的差值，从而求得被测量的一种方法。差值法实际上是一种不彻底的零值法。例如比较两个标准电池的电动势，其电路如图 1-2 所示，图中 E_0 为已知量，从电位差计可测出被测量 E_x 与已知量 E_0 的差值 δ 。然后再根据 E_0 和 δ 值求得 E_x 值。通常差值仅为被测量的很小一部分。例如 δ 是 E_x 的 $\frac{1}{100}$ ，如果测量 δ 产生千分之一的误差，那么反映到被测量 E_x 中仅为十万分之一误差。

(3) 替代法。替代法是将被测量与已知量先后接入同一测量仪器，如果不改变仪器的工作状态，则认为被测量等于已知量。这种方法由于测量仪器的状态不改变，所以内部特性和外界条件对前后二次测量的影响是相同的，测量结果与仪器本身的准确度无关，只取决于替代的已知量。曹冲称象是替代法的一个例子。

第二节 电工仪表的种类

测量各种电磁量的仪表仪器统称为电工仪表。电工仪表不仅可以用来测量各种电磁量，还可以通过相应的变换器用来测量非电磁量。例如温度、压力、速度等。尽管它应用广泛，品种规格繁多，但基本上可以分为两大类。

一、电测量指示仪表

电测量指示仪表又称为直读仪表,各种交直流电流表、电压表、功率表、万用表多系电测量指示仪表。这种仪表的特点是先将被测电磁量转换为可动部分的角位移。然后通过可动部分的指针在标尺上的位置直接读出被测量的值。指示仪表又可以分为以下几种类型:

- (1) 按准确度等级:可分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 等七级。
 - (2) 按使用环境条件:可分为 A、A₁、B、B₁、C 五个组。
 - (3) 按外壳防护性能:可分为普通、防尘、防溅、防水、水密、气密、隔爆等七种类型。
 - (4) 按仪表防御外界磁场或电场影响的性能:可分为 I、II、III、IV 四等。
 - (5) 按读数装置:可分为指针式、光指示式、振簧式等。
 - (6) 按使用方式:可分为安装式、可携式等。
 - (7) 按工作原理:可分为磁电系、电磁系、电动系、感应系、静电系、振簧系等。
- 此外还可以按可动部分的支承方式、机械结构的形式等来进行分类。

二、比较仪器

比较仪器用于比较法测量。它包括各类交直流电桥,交直流补偿式的测量仪器。上一节已经说过,比较法的测量准确度比较高,但操作过程复杂,测量速度较慢。

除了以上两大类之外,电工仪表还包括数字式仪表、记录式仪表、机械示波器等。不过机械示波器和记录式仪表的原理和一般电测量指示仪表相似,只是读数方式不同或附加有记录部分而已。所以可以看成是电测量指示仪表的特殊形式。至于扩大量程装置,如分流器、互感器也可以看做是仪表的附件不单独列成一类。度量器可以单独列成一类,也可以作为比较仪器的附件。

第三节 电测量指示仪表的组成和基本原理

一、电测量指示仪表的组成

电测量指示仪表的结构如图 1-3 所示,从图上可以看出,整个指示仪表可以分为测量线路和测量机构两个部分。

测量线路的作用是把被测量 x 转换为测量机构可以接受的过渡量 y (例如转换为电流);然后,再通过测量机构把过渡量 y 转换为指针的角位移 α 。由于测量线路中的 x 和 y ,测量机构中的 y 和 α ,能够严格保持一定的函数关系,所以可以根据角位移 α 的值,直接读出被测量 x 的值。

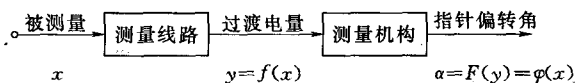


图 1-3 电测量指示仪表方框图

测量机构是电测量指示仪表的核心,没有测量机构就不成为电测量指示仪表。而测量线路则根据被测对象的不同而有不同的配置,如果被测对象可以直接为测量机构所接受,也可以不配置测量线路。例如变换式仪表,就是用磁电系仪表作为测量机构,不论是功率表、频率表还是相位表都用相同的测量机构做表芯,然后配上不同的变换器(即测量线路)以达到测量不同被测量的目的。为此,下面着重介绍一下测量机构的组成。

二、测量机构的组成与原理

电测量指示仪表的测量机构是由固定部分和可动部分组成的,以便能将被测测量转换为可动部分的偏转角,按可动部分在偏转过程中各元件所完成的功能和作用,可以把测量机构分为以下三个部分。

1. 产生转动力矩 M 的驱动装置

为了使电测量指示仪表的指针能够在被测量的作用下产生偏转,就必须有一个能产生转动力矩的驱动装置。不同类型的仪表,驱动原理也不一样,例如磁电系仪表是利用永久磁铁和通电线圈间的电磁力,以驱动可动部分偏转,而静电系仪表,则利用固定电极板和可动电极板之间的电场力,使可动部分得到转动力矩。

各种电磁力矩的大小除了与电磁场的强弱有关外,还取决于电磁场的分布状况。通常电磁场强弱由被测量的大小决定,而分布状况则与可动部分所处的位置有关。例如电磁系、电动系仪表其转动力矩 M 是 x 和 α 的二元函数,即 $M=F(x, \alpha)$ 。而磁电系仪表则由于气隙中磁场比较强,不受可动线圈位置影响,所以磁电系仪表的转动力矩 M 只与被测量 x 有关,并且是 x 的线性函数。

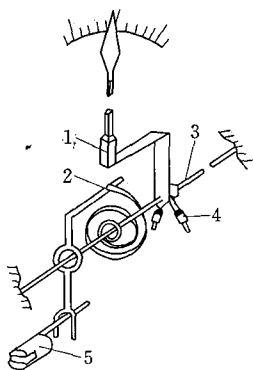


图 1-4 用弹簧游丝产生反作用力矩

1—指针; 2—弹簧游丝; 3—轴; 4—平衡锤; 5—调零器

2. 产生反作用力矩 M_a 的控制装置

如果测量机构只有驱动装置,而没有控制装置,则不论被测量 x 是大还是小,可动部分在转动力矩作用下,总是要偏转到尽头,好像一杆不挂秤砣的秤,不论被测重量多大,秤杆总是向上翘起。为了使被测量 x 大小不同时,可动部分能转过不同的角度,测量机构上需要设置能产生反作用力矩的控制装置。

如图 1-4 所示的盘形游丝就是一种常用的产生反作用力矩的装置。当可动部分在转动力矩作用下产生偏转时,就会同时扭紧游丝使游丝产生一个与转动力矩方向相反的反作用力矩。游丝是一种弹性材料,所以在弹性范围内反作用力矩的大小正比于扭动游丝的偏转角 α 即

$$M_a = D\alpha \quad (1-3)$$

式中 D ——反作用力矩系数,由游丝的材料、外形所决定;
 α ——可动部分的偏转角。

当转动力矩等于反作用力矩时,即 $M=M_a$,可动部分就停止。对于磁电系仪表,这时对应的偏转角 α 可按下式推得,设 $M=F(x)$,则

$$F(x) = D\alpha$$

$$\alpha = \frac{F(x)}{D} \quad (1-4)$$

如果用图形表示,则如图 1-5 所示,假设转动力矩 M 是 x 的函数,而与可动部分所在的位置 α 无关,转矩曲线是一条与 α 坐标轴平行的直线。而 M_a 与 α 成正比,所以反作用力矩曲线是一条向上倾斜的直线。两线的交点就是可动部分平衡点,对应的角度 α 就是可动部分停止位置。转动力矩 M 不同时,例如 $M=M'$ 或 $M=M''$,对应的 α 也不同。从图 1-5 中还可以看出,当外界因素(如振动)使可动部分偏离平衡位置时,如图上 M_1 或 M_2 点,将

使 $M \neq M_a$ ，从而产生差力矩，这个力矩我们称之为定位力矩 M_b ，即

$$M_b = M - M_a \quad (1-5)$$

定位力矩将力图使仪表的可动部分返回原来的平衡位置。但是由于轴尖与轴承间总是存在摩擦力，可动部分总是没有办法回到原来的平衡点，从而造成仪表的示数误差，这种误差也称为摩擦误差，它是仪表基本误差的一部分。为了减少摩擦误差，可以提高游丝反作用力矩系数 D ，以便增加定位力矩，也可以想法减轻可动部分的重量，或提高制造精度减少摩擦力矩。

除了用游丝产生反作用力矩外，还可以用张丝、吊丝或重力装置，也有用电磁力产生反作用力矩，例如比率型仪表。

3. 产生阻尼力矩 M_d 的阻尼装置

从转动力矩和反作用力矩的关系可知，可动部分受转动力矩作用后，最终总会停在一个平衡位置上，但由于可动部分具有一定的转动惯量，故可动部分达到平衡位置后，并不立即停止，往往要超过平衡点，而定位力矩又会使它返回到平衡位置，这就造成指针在读数位置来回摆动的现象。

为了尽快读数，测量机构必须设有吸收这种振荡能量的阻尼装置，以便产生与可动部分运动方向相反的力矩。应当指出，阻尼力矩是一种动态力矩。当可动部分稳定后，它就不复存在。因此，阻尼力矩并不改变由转动力矩和反作用力矩所确定的偏转角。

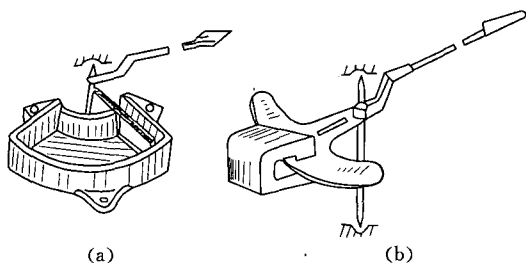


图 1-6 阻尼器
(a) 空气阻尼器；(b) 磁感应阻尼器

常用的阻尼装置有两种，一种是空气阻尼器，利用可动部分运动时带动阻尼翼片，使翼片在一个密封的阻尼箱中运动。从而产生空气阻力作为阻尼力矩。它的结构如图 1-6 (a) 所示。另一种是感应阻尼器，利用可动部分运动时带动一个金属阻尼片，使之切割阻尼磁场的磁力线，从而使阻尼片产生涡流，涡流与磁场形成的电磁力作为阻尼力矩，它的结构如图 1-6 (b) 所示。

此外还有油阻尼，这种阻尼装置结构比较复杂，多用于高灵敏度的张丝仪表中。测量机构除了以上三种主要装置外，还应有指示装置，即指针式的指针与度盘、光标式的光路系统和刻度尺、调零器、平衡锤、止动器、外壳等部分。

第四节 电测量指示仪表的误差和准确度

一、仪表误差的分类

无论仪表的制造工艺多么完美，仪表的误差总是无法完全消除的。仪表的误差是指仪

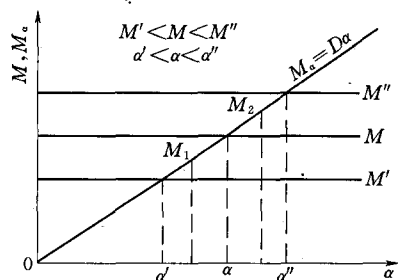


图 1-5 转动力矩、反作用力矩与偏转角 α 的关系

表的指示值与被测量真值之间的差异。而仪表的准确度是指仪表指示值与被测量真值之间的接近程度。可见仪表准确度越高，它的误差就越小。

仪表的误差分为以下两类。

1. 基本误差

仪表在规定条件下，即在规定的温度、湿度、规定的放置方式，在没有外界电场和磁场干扰等条件下，由于制造工艺的限制，仪表本身所固有的误差。例如摩擦误差、标尺刻度不准、轴承与轴间间隙造成的倾斜误差等都属于基本误差。

2. 附加误差

仪表在规定的工作条件之外使用，例如温度过高，波形非正弦，或受外电场或外磁场的影响所引起的误差都属于附加误差。因此，仪表离开规定的工作条件形成的总误差中，除了基本误差之外，还包含有附加误差。

二、误差的表示方法

1. 绝对误差 Δ

测量值 A_x 与被测量真值 A_0 之差，称为绝对误差 Δ ，即

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-6)$$

由式 (1-6) 可知，绝对误差的单位与被测量的单位相同。绝对误差的符号有正负之分，用绝对误差表示仪表误差的大小比较直观。

【例 1-1】 用一电压表测量电压，其读数为 201V，而标准表的读数（认为是真值）为 200V，求绝对误差。

解：由式 (1-6) 得

$$\Delta = A_x - A_0 = 201 - 200 = 1 \text{ (V)}$$

2. 相对误差 γ

用绝对误差有时很难判断测量结果的准确程度。例如用一个电压表测量 200V 电压，绝对误差为 +1V，而用另一个电压表测量 20V 电压，绝对误差为 +0.5V。前者的绝对误差大于后者，但误差值对测量结果的影响，后者却大于前者，因此衡量对测量结果的影响，通常要用相对误差表示。

所谓相对误差，等于绝对误差 Δ 与被测量真值 A_0 之比，并用百分数表示为

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-7)$$

由于测量值与真值相差不大，故式 (1-7) 中的 A_0 可以用 A_x 代替，即相对误差表示为

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (1-8)$$

上面两块电压表测量的结果如果用相对误差表示如下：

第一块电压表为

$$\gamma_1 = \frac{\Delta_1}{A_{x1}} \times 100\% = \frac{1}{200} \times 100\% = 0.5\%$$

第二块电压表为

$$\gamma_2 = \frac{\Delta_2}{A_{x2}} \times 100\% = \frac{0.5}{20} \times 100\% = 2.5\%$$

可见用第一块电压表测量的结果，绝对误差 Δ_1 比 Δ_2 大，但其相对误差 γ_1 却比 γ_2 小。所以相对误差反映了测量结果的准确程度。

3. 引用误差 γ_n

引用误差指的是用仪表表示值计算的相对误差。它是以某一刻度点读数的绝对误差 Δ 为分子，以仪表的上量限为分母，其比值称为引用误差，用 γ_n 表示，即

$$\gamma_n = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (1-9)$$

由于仪表不同刻度点的绝对误差略有不同，其值有大有小，如取可能出现的最大绝对误差 Δ_m 与仪表上量限 A_m 之比，则称该比值为最大引用误差，即

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \quad (1-10)$$

这是一种简化的和比较实用的表示方法。说它简化，是因为不论读数为多少，分母都取仪表的上量限。这样在读数接近上量限时，它可以反映测量结果的相对误差，但在读数较小时，可能与实际的测量结果相对误差有较大的差别。说它实用，是因为引用误差可以用来确定仪表的准确度级别。

仪表的准确度决定于仪表本身的性能。通常仪表的绝对误差在仪表标尺的全长上基本保持恒定，而相对误差却随着被测量的减少逐渐增大，所以相对误差的数值并不能说明仪表的优劣，只能说明测量结果的准确程度。引用误差，即式 (1-10) 中的分子、分母是由仪表本身的性能所决定，因此，这是一种判断仪表性能优劣比较简便的方法。

三、仪表的准确度

仪表各示值的绝对误差有一些小差别，因此规定用最大引用误差表示仪表的准确度。即

$$K\% = \frac{|\Delta_m|}{A_m} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中 Δ_m ——仪表的最大绝对误差；

K ——仪表准确度；

A_m ——仪表的上量限。

K 的值表示仪表在规定使用条件下，允许的最大引用误差的百分数。仪表的准确度越高，最大引用误差越小，也就是基本误差越小。

根据 GB776—76《电测量指示仪表通用技术条件》规定，仪表准确度分为七级，它们的基本误差在标尺工作部分的所有分度线上不应该超过表 1-1 的规定。

表 1-1

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 (%)	±0.1	±0.2	±0.5	±1.0	±1.5	±2.5	±5.0

仪表离开规定工作条件下使用，其附加误差会使仪表误差发生改变，不同准确度、误差改变允许值在 GB776—76《电测量指示仪表通用技术条件》中也作了相应规定。

第五节 电测量指示仪表的主要技术性能

在国家标准中对各类型仪表所应具备的技术性能都做了相应规定, 这些性能包括以下几点。

一、仪表灵敏度

仪表灵敏度是指仪表可动部分偏转角变化量与被测量变化量的比值, 即

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x} \quad (1-12)$$

如果被测量 x 与偏转角 α 成正比例关系, 则 S 为常数, 可得到均匀的标尺刻度, 这时

$$S = \frac{\alpha}{x} \quad (1-13)$$

仪表的灵敏度取决于仪表的结构和线路。通常将灵敏度的倒数称为仪表常数 C , 均匀标尺的仪表常数

$$C = \frac{x}{\alpha} \quad (1-14)$$

二、仪表误差

因为任何仪表的误差都无法彻底消除, 所以误差大小是仪表重要技术性能之一, 它表征仪表的准确程度, 误差愈小, 准确度愈大。

仪表误差包括基本误差和附加误差。仪表在测量过程中还产生一种误差叫升降变差, 升降变差指测量被测量 A_0 时, 指针从零向上量限摆动的读数为 A'_0 , 而从上量限向零方向摆动的读数为 A''_0 , A'_0 与 A''_0 之差就是变差, 即 $\Delta = A'_0 - A''_0$ 。升降变差也包括在基本误差之内。仪表的基本误差和附加误差都不能超过国家标准的规定。

视差是测量时产生的读数误差。为了减少视差, 不同准确度的仪表, 对指针和标尺的结构也有不同要求。图 1-7 是一种附有镜面的标尺, 读数时应使眼睛、指针和镜中影像成一直线。

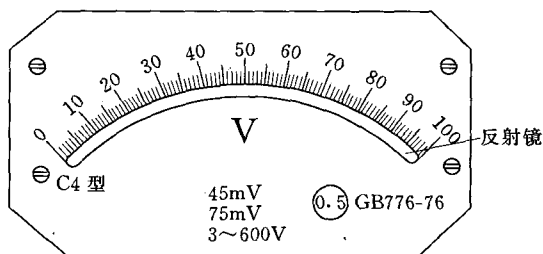


图 1-7 精密仪表的标尺

三、仪表的阻尼时间

仪表阻尼时间指仪表接入被测量至仪表指针摆动幅度小于标尺全长 1% 所需要的时间。阻尼时间要尽可能短, 以便迅速取得读数, 一般不得超过 4s; 对于标尺长度大于 150mm 者, 不得超过 6s。

四、仪表的功率损耗

电测量指示仪表接入被测电路, 总要消耗一定能量, 这不但会引起仪表内部发热, 而且影响被测电路的原有工作状态。从而产生测量误差。仪表的功率损耗应尽量的小。

五、仪表的坚固性与可靠性

仪表的坚固性与可靠性, 指仪表所能耐受的负载能力, 仪表的绝缘强度以及在机械力作用下不受损坏、在气候条件改变时能保持正常工作的能力等。

第六节 测量误差及其消除方法

不论是采用什么样的测量方式和方法,也不论采用什么样的仪器仪表,由于仪表本身不够准确,测量方法不够完善以及实验者本人经验不足,人的感觉器官不完善等原因,都会使测量结果与被测量的真值之间存在着差异,这种差异就成为测量误差,测量误差可分为三类。

一、系统误差

测量过程保持恒定或者遵循某种规律变化(例如有规律地逐渐增大或周期性地增大和减少)的误差称为系统误差。系统误差总是由于某种特定的原因引起的,这些原因包括仪表本身的基本误差和附加误差。如果能设法消除产生这些误差的原因,则系统误差也会随之消除。例如由于仪表放置不当造成的误差,那么正确安装之后误差也就消除。但多数情况下产生这种误差的原因是无法消除的,只能采取一些特殊的测量方法减少这种误差。消除系统误差有以下几种方法。

1. 用比较法消除系统误差

在本章第一节中已经说过,零值法和差值法可以消除或减弱电测量指示仪表的系统误差。替代法不仅可以消除指示仪表的误差,而且比较仪器产生的误差也可以得到消除。图

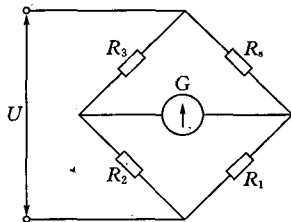


图 1-8 替代法测电阻

1-8 表示用电桥法测电阻的电路。先将被测电阻 R_x 接入电桥可求得其值为

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2} \quad (1-15)$$

如果 R_1 、 R_2 、 R_3 三个桥臂电阻存在一定误差,其值分别为 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 ,则读出值 R_{x0} 也比电阻的真实值 R_x 相差 ΔR_x ,即

$$R_{x0} = R_x + \Delta R_x = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_2 + \Delta R_2} (R_3 + \Delta R_3) \quad (1-16)$$

现在用一个已知的标准电阻 R_s 代替 R_x 接入电桥,在 R_1 、 R_2 、 R_3 保持不变的情况下,如仍使电桥平衡,则有

$$R_{s0} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_2 + \Delta R_2} (R_3 + \Delta R_3) = R_s + \Delta R_s \quad (1-17)$$

比较两式得

$$R_x = R_s$$

这就消除了 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 对读数的影响, R_x 只决定于 R_s ,而与 R_1 、 R_2 、 R_3 值的读数无关。也就是跟比较仪器的准确度无关。

2. 正负误差补偿法

为了消除系统误差,还可以采用正负误差补偿法,即对同一被测量反复测量两次,并使其中一次误差为正,另一次误差为负,取其平均值,便可消除系统误差。例如为了消除外磁场对电流表读数的影响,可在一次测量之后,将电流接入方向调转 180° ,重新测量一

次，取前后两次测量结果的平均值，可以消除外磁场带来的系统误差。

3. 利用校正值求出被测量的真值

在精密测量中也常常使用校正值，所谓校正值就是被测量的真值 A_0 （即标准仪表的读数）与仪表读数 A_x 之差，用 δ_y 表示，即

$$\delta_y = A_0 - A_x \quad (1-18)$$

由式 (1-18) 可知，校正值在数值上等于绝对误差，但符号相反，即

$$\Delta = A_x - A_0 = -\delta_y \quad (1-19)$$

如果在测量之前能预先求出测量仪表的校正值，或给出仪表校正后的校正曲线或校正表格，就可以从仪表读数与校正值求得被测量的真值，即

$$A_0 = A_x + \delta_y \quad (1-20)$$

图 1-9 表示某一电流表的校正曲线，从曲线可以看出，该电流最大绝对误差 $\Delta_m = 0.13A$ ，则仪表准确度为

$$K\% = \frac{|\Delta_m|}{A_m} \times 100\% = \frac{0.13}{5} \times 100\% = 2.6\%$$

如果电流表读数为 3.5A，该读数的校正值为 +0.13A，则

$$A_0 = A_x + \delta_y = 3.5 + 0.13 = 3.63 (A)$$

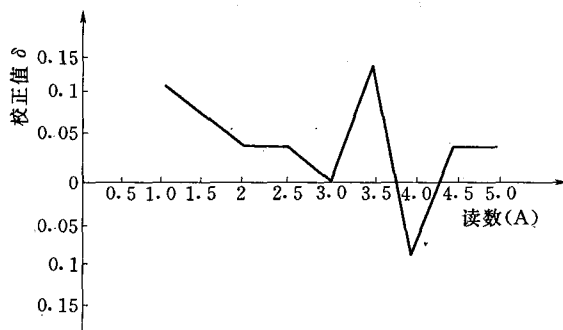


图 1-9 校正曲线

二、偶然误差

偶然误差也称随机误差，这是一种大小、符号都不确定的误差，这种误差是由周围环境的偶发原因引起的，因此无法加以消除，但这种误差具有以下几个特征。第一，在一定测量条件下，随机误差的绝对值不会超过一定界限，即所谓有界性；第二，绝对值小的误差出现的机会多于大的误差，即所谓单峰性；第三，当测量次数足够多时，正误差和负误差出现的机会基本相等，即所谓对称性。如果用 δ 表示误差，用 f 表示误差出现次数， δ 和 f 的关系如图 1-10 曲线所示。这个曲线称为随机误差正态分布曲线。

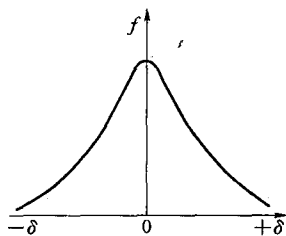


图 1-10 随机误差正态分布曲线

由于随机误差具有以上这些特性，所以在工程上可以对被测量进行多次重复测量，然后用它们的算术平均值表示被测量的真值，即

$$A_0 = \bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad (1-21)$$

式中 A ——算术平均值；

n ——测量次数。

如果测量次数不够多，算术平均值与真值偏离较大，因此用算术平均值表示测量结果时，其测量精度可用标准差表示，即

$$A_0 = \bar{A} \pm \sigma_x \quad (1-22)$$

式中 σ_x ——标准差。

根据概率论原理，所谓标准差可通过均方根差 σ 或剩余误差 $V_i = A_i - \bar{A}$ (A_i 为每次测量值) 求出，即

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \cdots + V_n^2}{n(n-1)}} \quad (1-23)$$

应该指出，用算术平均值表示测量结果，首先要消去系统误差，因为有系统误差存在时，测量次数尽管足够多，算术平均值也不可能接近被测量真值。

例如对某一电压进行了 15 次测量，求得其算术平均值为 20.18，并计算得出均方根差为 0.34，标准差 $\sigma_x = \frac{0.34}{\sqrt{15}} = 0.09$ ，可写出其测量结果及误差评价为

$$A = \bar{A} \pm \sigma_x = 20.18 \pm 0.09$$

现在常用的电子计算器，都设有计算算术平均值和均方根误差的按键，利用它来处理随机误差，计算起来十分方便。

三、疏忽误差（粗差）

疏忽误差是一种严重偏离测量结果的误差，这种误差是由于实验者粗心、不正确操作和试验条件突变等引起的。例如读数误差、记录错误所引起的误差都是属于疏忽误差。由于包含疏忽误差之后的实验数据是不可信的，所以应该舍弃不用，凡是剩余误差 V_i 大于 $|3\sigma|$ 的数据，都认为是包含疏忽误差的数据，应该予以剔除。

第七节 工程上最大测量误差的估计

在工程上因为偶然误差比较小，常常都略去不计，只有在精密测量或精密实验中需要按偶然误差的理论，对实验数据进行处理，在工程上主要考虑的是系统误差。系统误差可按下面方法进行计算。

一、直接测量方式的最大误差

测量仪表的准确度 K 用最大引用误差表示即

$$K\% = \frac{|\Delta_m|}{A_m} \times 100\% \quad (1-24)$$

式中 Δ_m ——最大绝对误差；

A_m ——仪表最大量限。

可见用直读仪表测量，可能出现的最大误差按式 (1-24) 计算为

$$\Delta_m = \pm \frac{K\% A_m}{100\%} = \pm K\% A_m \quad (1-25)$$

如果已知仪表的准确度为 K 级，最大量限为 A_m ，测量时读数为 A_x 则被测量 A_x 的可能最大相对误差为

$$\gamma = \pm \frac{K\% A_m}{A_x} \times 100\% \quad (1-26)$$