

高等专科学校试用教材

电气测量

陈立周 编

机械工业出版社

3

GAOZHUANJIAOCAI

前 言

本书是高等专科学校工业企业电气化和电机制造两个专业的试用教材。是根据机械工业部教育局初步审定的招收高中毕业生，学制为三年的教学大纲组织编写的。

本书也适用于职工大学、业余大学。中等专业学校也可选用，并可供有关工程技术人员参考。

全书共分两篇，第一篇介绍电工测量仪表，重点放在介绍基本电量和主要电路参数的测量仪器上，还介绍了各种测量方法和各种仪表的比较以及选择、使用、操作方面的内容。第二篇介绍常用的电子仪器，除了常用的电子管电压表和示波器外，重点介绍了晶体管电压表和晶体管示波器，在内容安排上着重于电子仪器的调整、操作和应用。此外，还介绍了磁的测量和非电量的测量。这样使本书在电磁测量方面的内容更加完整。

目 录

前言

第一篇 电工仪表与测量

第一章 电工仪表与测量的基本知识	1
§ 1-1 测量方法的分类	1
§ 1-2 电工仪表的分类	3
§ 1-3 电测量指示仪表的组成和基本原理	3
§ 1-4 电测量指示仪表的误差和准确度	6
§ 1-5 电测量指示仪表的主要技术性能	8
§ 1-6 测量误差及其消除方法	9
§ 1-7 工程上最大测量误差的估计	11
第二章 电流与电压的测量	15
§ 2-1 电流与电压的测量方法	15
§ 2-2 磁电系仪表	16
§ 2-3 磁电系检流计	21
§ 2-4 电磁系仪表	23
§ 2-5 电动系仪表	27
§ 2-6 测量用互感器	30
§ 2-7 万用电表	34
§ 2-8 直流电位差计	42
§ 2-9 电流表与电压表的使用与选择	44
第三章 功率和电能的测量	49
§ 3-1 功率和电能的测量方法	49
§ 3-2 电动系功率表	51
§ 3-3 低功率因数功率表	55
§ 3-4 三相功率的测量	56
§ 3-5 感应系电度表及电能的测量	58
§ 3-6 三相有功电度表	63
§ 3-7 三相无功电度表和无功电能的测量	63
第四章 频率和相位的测量	67
§ 4-1 频率的测量方法	67
§ 4-2 电动系频率表	71
§ 4-3 电动系相位表	73
第五章 电路参数的测量	76
§ 5-1 电路参数的测量方法	76
§ 5-2 直流单电桥	81

IV

§ 5-3 直流双电桥	83
§ 5-4 带电测温装置	84
§ 5-5 交流阻抗电桥	86
§ 5-6 变压器比率臂电桥	90
§ 5-7 兆欧表	94
§ 5-8 接地电阻测量仪	98
第六章 磁的测量	100
§ 6-1 概述	100
§ 6-2 磁场的测量	101
§ 6-3 磁性材料的测量	104
第七章 非电量的电测法	109
§ 7-1 概述	109
§ 7-2 传感器	110
§ 7-3 测量线路	117

第二篇 常用电子仪器与测量方法

第八章 电子管和晶体管电压表	120
§ 8-1 电子管电压表的结构和原理	120
§ 8-2 电子管电压表的检波电路	122
§ 8-3 交流放大—检波式的电子管电压表	126
§ 8-4 检波—直流放大式的电子管电压表	130
§ 8-5 电子管电压表的使用	136
§ 8-6 晶体管电压表	138
第九章 电子示波器	147
§ 9-1 电子示波器的结构和原理	147
§ 9-2 示波管	148
§ 9-3 示波器的电源	152
§ 9-4 示波器的Y通道	154
§ 9-5 示波器的X通道	158
§ 9-6 通用示波器的典型电路和操作方法	163
§ 9-7 变器的应用	181
§ 9-8 非线性曲线的专用示波器	186
附录 电测量指示仪表和附件的符号	192

第一篇 电工仪表与测量

电测量主要指电流、电压、功率、电能、相位、频率、电阻、电感、电容以及时间常数和介质损耗角等的测量。磁测量主要指磁场以及物质在磁场磁化下的各种磁特性的测量。例如磁场强度、磁通、磁感应强度、磁势、磁导率、磁滞和涡流损耗等的测量。电测量和磁测量又可统称为电磁测量或电气测量。

电磁测量技术是研究各种电磁被测量的测量方法；不同测量方法所应配备的仪表仪器设备；仪器设备的原理与结构；测量时的操作技术以及如何根据测出数据进行数据处理以求出测量结果和测量误差。

电磁测量技术对一个从事电气技术工作的人员来说是十分必要的。因为，不论是电气设备的安装、调试、实验、运行、维修；还是对电气产品进行检验、测试、鉴定都会遇到这些电磁测量方面的技术问题。

第一章 电工仪表与测量的基本知识

§ 1-1 测量方法的分类

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（已知量）进行比较，以求得被测量的值，达到定量的一个认识过程。所以进行电工测量，实际上就是将被测电磁量直接或间接地与作为测量单位的同类量进行比较的过程。度量器就是测量单位或测量单位的分数、整数倍的复制体。例如标准电池、标准电阻、标准电感就是电势、电阻、电感单位的复制体，根据度量器在量值传递上的作用和不同的准确度，分为基准器、标准器和工作量具三种。其中基准器和标准器是由国家计量部门管理的，而日常测量用的是工作量具。在测量过程中根据采用测量仪器的不同，测量结果如何取得，以及度量器是否直接参与，又形成了不同的测量方式和方法。

一、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在比较仪器上进行比较，或者采用事先刻好度数的仪表进行测量，从而求得被测量的数值，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。

2. 间接测量

如果被测量不便于直接测定，或直接测量该电磁量的仪器不够准确，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。

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一可测量的不同组合, 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 , 可以分别测量 20°C 和 t_1 、 t_2 时的电阻数值 r_{20} 、 r_{t_1} 、 r_{t_2} , 然后求解联立方程, 从而求得 α 、 β 的值。即

$$r_{t_1} = r_{20} [1 + \alpha (t_1 - 20) + \beta (t_1 - 20)^2] \quad (1-1)$$

$$r_{t_2} = r_{20} [1 + \alpha (t_2 - 20) + \beta (t_2 - 20)^2] \quad (1-2)$$

若其中 t_1 、 t_2 、 r_{20} 、 r_{t_1} 、 r_{t_2} 为已知, 可以将这些值代入, 即可求出 α 、 β 。

二、测量方法分类

直接测量需要测出被测量, 间接测量需要测出中间量, 这些量的测量可采用以下几种的不同方法。

1. 直读法

用电测量指示仪表读取被测量的数值, 这种方法称为直读法。直读法从表面上看好像没有度量器参与, 实际上直读式的电测量指示仪表进行刻度时仍有度量器参与。也可能刻度时并不借助度量器, 而是用标准表进行刻度, 但是标准表本身还是需要借助度量器刻度。所以直读法实际上是一种与度量器间接比较的方法, 这种方法简便迅速, 但它的准确度受仪表误差的限制。

2. 比较法

比较法是指被测量与度量器在比较仪器中进行比较, 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、防电磁干扰等都不能超过规定值。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时, 使这二种量对仪器的作用相消为零, 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 $R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_0$, 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, 所以仪表误差不会影响测量准确度。测量准确度只决定于度量器和指示仪表的灵敏度。天平测重量也是一种零值法的例子。

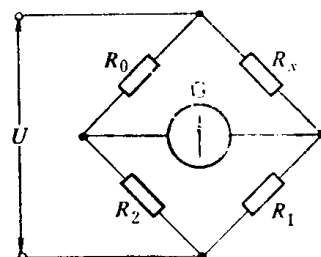


图1-1 零值法测电阻

(2) 较差法: 较差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。较差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。

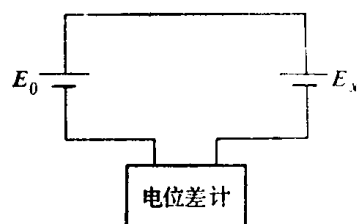


图1-2 较差法测电势

图中 E_0 为已知量, 从电位差计可以测出被测量 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, 只决定于替代的已知量。

§ 1-2 电工仪表的分类

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。由于它应用广泛, 品种规格繁多, 基本上可以分为两大类。

一、电测量指示仪表类

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、比较仪器类

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, 但操作手续比较复杂, 测量速度比较慢。

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。

§ 1-3 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。

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、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。为此在下面着重讨论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所组成的，以便能将被测量转换为可动部分的偏转角，如果按可动部分在偏转过程中各元件所完成的功能和作用，也可以把测量机构分为以下三个部分。

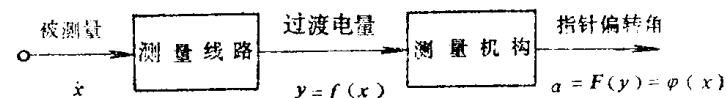


图1-3 电测量指示仪表方框图

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，还要决定于电磁场的分布状态。通常电磁场强弱由被测量的大小所决定，而分布状态则与可动部分所处的位置有关。例如象电磁系、电动系仪表其转动力矩就同时受被测量 x 和可动部分偏转角 α 两个因素的影响。也就是说这类仪表的转动力矩 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，不受可动线圈位置的影响，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。

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，好象一杆不挂秤砣的秤，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。

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

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

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，可动部分就停止，这时对应的偏转角 α 可按下式推得

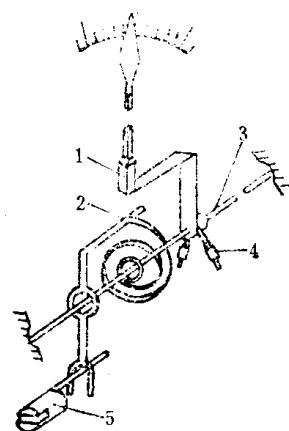


图1-4 用弹簧游丝产生反作用力矩

1—指针 2—弹簧游丝 3—轴
4—平衡锤 5—调零器

$$M = M_a$$

对于磁电系仪表, 设 $M = F(x)$

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

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

如果用图形表示, 则如图 1-5, 假设转动力矩 M 是 x 的函数, 而与可动部分所在位置 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。

从图上还可以看出, 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 $M - M_a$, 这个力矩我们称之为定位力矩 M_s 。

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

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, 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个部分。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, 例如比率型电表。

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, 即阻尼力矩。

应当指出, 阻尼力矩是一种动态力矩, 当可动部分稳定之后, 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。

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

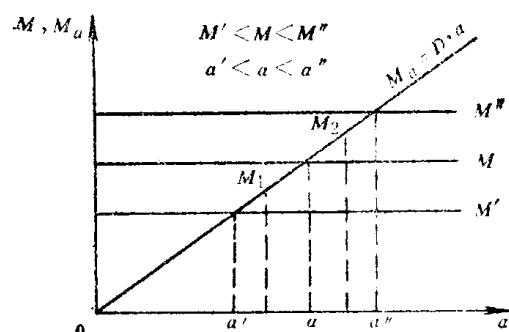


图1-5 转动力矩、反作用力矩与偏转角 α 的关系

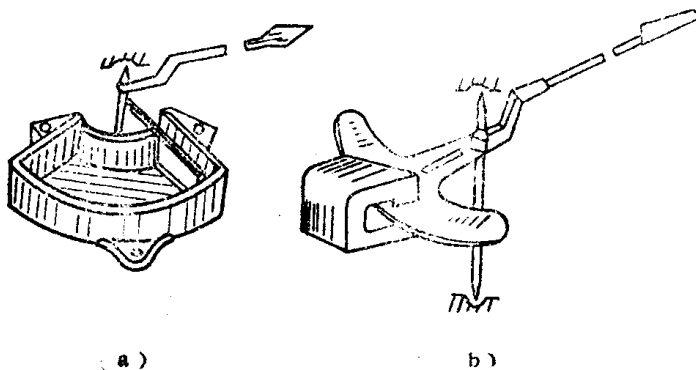


图1-6 阻尼器

a) 空气阻尼器 b) 磁感应阻尼器

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。

§ 1-4 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如何完美, 仪表的误差总是无法完全消除的。仪表的误差是指仪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。

仪表的误差分为两类

1. 基本误差

仪表在规定的工作条件下, 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、轴承与轴尖间隙造成的倾斜误差等都属于基本误差。

2. 附加误差

仪表离开规定的工作条件, 例如温度过高, 波形非正弦, 外电场或外磁场的影响所引起的误差都属于附加误差。为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

测量值 A_x 与被测量真值 A_0 之差称为绝对误差 Δ

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

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

解: 由式 (1-6) 得

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

2. 相对误差

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 200 V 电压, 绝对误差为 +1 V, 而用另一个电压表测量 20 V 电压, 绝对误差为 +0.5 V。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 与被测真值 A_0 之比, 并用百分数表示

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

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

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

例：用一只电压表测量 200 V 电压，绝对误差为 +1 V，用另一只电压表测量 20 V 电压，绝对误差为 +0.5 V，求两次相对误差

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

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

可见用第一只电压表测量的结果，绝对误差 Δ_1 比 Δ_2 大，但其相对误差 γ_1 却比 γ_2 小。

3. 引用误差

所谓引用误差指的是一种简化和实用方便的仪器表示值的相对误差。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，它的比值称为引用误差。用 γ_n 表示

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

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，则称为最大引用误差。

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

说它是简化，因为不论读数为多少，分母都取仪表的上量限。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。说它实用因为引用误差可以用来确定仪表仪器的准确度级别。

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，而且有可能增至无限大，所以相对误差的数值并不能说明仪器的优劣，只能说明测量结果的准确程度。引用误差则由于式 (1-10) 中的分子、分母都由仪表本身性能所决定，所以是一种比较简便的方法来判断仪表的性能。

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 K ——仪表准确度。

K 的数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。仪表的准确度愈高，最大引用误差愈小，也就是基本误差愈小。

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越过表 1-1 的规定。

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 GB 776-76 中也作了相应规定。

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

§ 1-5 电测量指示仪表的主要技术性能

各类型仪表所应具备的技术性能，在国家标准中都做了相应规定，这些性能包括

一、仪表灵敏度

仪表灵敏度指仪表可动部分偏转角变化量与被测量变化量的比值

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

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

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

仪表的灵敏度决定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

因为任何仪表总是存在着误差，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，升降变差也包括在基本误差之内，升降变差指重复测量被测量 A ，指针从零向上量限摆动时读数为 A' ，而从上量限向零方向摆动时读数为 A'' ， A' 与 A'' 之差就是变差，即 $\Delta = A' - A''$ 。仪表的基本误差和附加误差都不能超过国家标准的规定。

视差固然是测量时产生的读数误差，但为了减少视差，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 1-8 为不同结构的指针，其中刀形指针用于实验室仪表，矛形指针则用于安装式仪表。

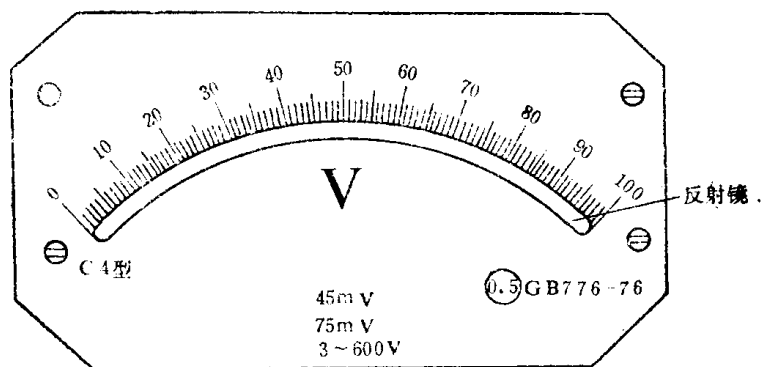


图1-7 精密仪表的标尺

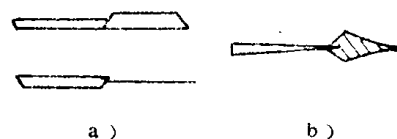


图1-8 指针的结构

a) 刀形指针 b) 矛形指针

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。

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过负载能力,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。

§ 1-6 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,这种差异就称为测量误差,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。系统误差总是由某个特定的原因引起的,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误差,那么正确安放之后误差也就消除,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。

1. 用比较法消除系统误差

在第一节中已经说过,零值法和较差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1-9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

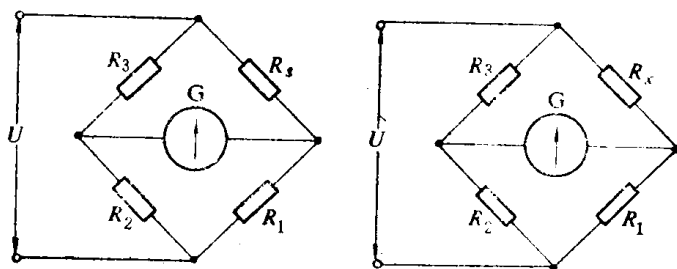


图1-9 替代法测电阻

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

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 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, 将电流表位置调转 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_r 表示

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

由式 (1-18) 可知, 校正值在数值上等于绝对误差, 但符号相反。

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

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, 那么就可以从仪表读数与校正值求得被测量的真值即

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

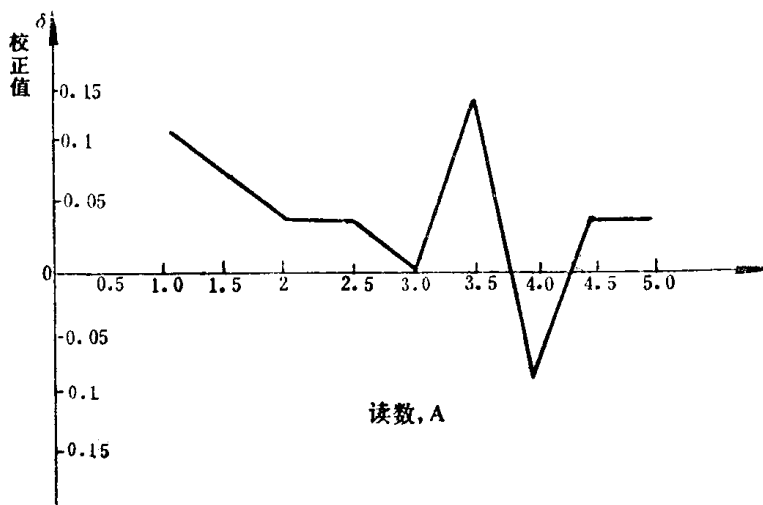


图1-10 校正曲线

图 1-10 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

$$\Delta_m = 0.13 \text{ A}$$

仪表准确度

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

如果电流表读数为 3.5 A, 该读数的校正值为 +0.13 A

$$A_0 = A_x + \delta_r = 3.5 + 0.13 = 3.63 \text{ A}$$

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 (1-11) 曲线所示。这个曲线称为随机误差正则分布曲线。

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 $\bar{A}$ ——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

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

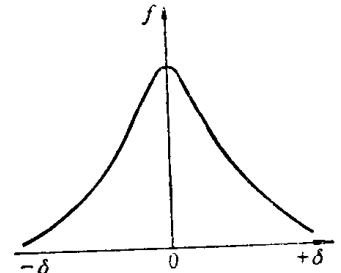


图1-11 随机误差
 正则分布曲线

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上,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

这是一种严重歪曲测量结果的误差,例如读数错误、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 大过 $|3\sigma|$ 的数据都认为是包含疏忽误差的数据,应该予以剔除。

§ 1-7 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:

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

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时,可能出现的最大误差可按下式计算

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

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

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

例: 用最大量限为 30 A、准确度为 1.5 级的安培表,测得某电流为 10 A,求可能出现的最大相对误差。

$$\gamma = \frac{0.015 \times 30}{10} \cdot 100\% = \pm 4.5\%$$

即最大相对误差为 4.5%。

二、间接测量方式的最大误差

1. 被测量 y 为 n 个量的和,即

$$y = x_1 + x_2 + x_3 \quad (1-26)$$

式中 x_1 、 x_2 、 x_3 为与被测量有关的几个已知量。

如用 Δy 表示被测量的绝对误差, Δx_1 、 Δx_2 、 Δx_3 代表测量 x_1 、 x_2 、 x_3 时的绝对误差,可得

$$y + \Delta y = (x_1 + \Delta x_1) + (x_2 + \Delta x_2) + (x_3 + \Delta x_3) \quad (1-27)$$

$$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 \quad (1-28)$$

二端同除以 y

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x_1}{y} + \frac{\Delta x_2}{y} + \frac{\Delta x_3}{y} \quad (1-29)$$

我们感兴趣的是求得被测量的最大相对误差,显然它是出现在各个量的相对误差为同一符号的情况,设 γ 表示最大相对误差

$$\gamma_y = \left| \frac{\Delta x_1}{y} \right| + \left| \frac{\Delta x_2}{y} \right| + \left| \frac{\Delta x_3}{y} \right| = \left| \frac{x_1}{y} \gamma_1 \right| + \left| \frac{x_2}{y} \gamma_2 \right| + \left| \frac{x_3}{y} \gamma_3 \right| \quad (1-30)$$

式中 $\gamma_1 = \frac{\Delta x_1}{x_1}$ 、 $\gamma_2 = \frac{\Delta x_2}{x_2}$ 、 $\gamma_3 = \frac{\Delta x_3}{x_3}$ 分别表示 x_1 、 x_2 、 x_3 各量的相对误差。

例: 用安培表测量各支路电流

第一支路为 15 A $\gamma_1 = \pm 2\%$

第二支路为 25 A $\gamma_2 = \pm 3\%$

求电路总电流和可能的最大相对误差

解: 如图 1-12 所示

$$I = I_1 + I_2 = 15 + 25 = 40 \text{ A}$$

最不利时被测结果的最大相对误差取同符号,即

$$\gamma = \frac{I_1}{I} \gamma_1 + \frac{I_2}{I} \gamma_2 = \frac{15}{40} \times 2\% + \frac{25}{40} \times 3\% = 2.63\%$$

2. 被测量 y 为两个量之差

$$y = x_1 - x_2 \quad (1-31)$$

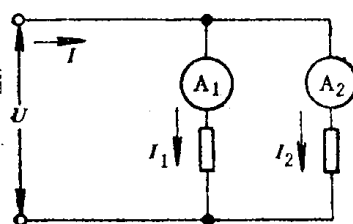


图 1-12

用上述同样方法可求出被测量可能的最大相对误差。即同样用 Δy , Δx_1 , Δx_2 分别表示被测量 y 和已知量 x_1 、 x_2 的绝对误差, 则

$$y + \Delta y = (x_1 + \Delta x_1) - (x_2 + \Delta x_2) \quad (1-32)$$

考虑到最不利情况是 Δx_1 、 Δx_2 取相同符号, $\Delta y = |\Delta x_1| + |\Delta x_2|$ 则

$$\gamma = \frac{\Delta y}{y} = \frac{|\Delta x_1| + |\Delta x_2|}{y} = \left| \frac{x_1}{y} \gamma_1 \right| + \left| \frac{x_2}{y} \gamma_2 \right| \quad (1-33)$$

由于 $y = x_1 - x_2$ 代入上式得

$$\gamma = \left| \frac{x_1}{x_1 - x_2} \cdot \gamma_1 \right| + \left| \frac{x_2}{x_1 - x_2} \gamma_2 \right| \quad (1-34)$$

可见被测结果为两量之差时, 可能的最大相对误差不仅与各个测量结果的相对误差 γ_1 、 γ_2 有关, 而且与两个已知量之差有关。若两量之差越大, 被测量可能的最大相对误差越小, 反之两量之差越小, 则相对误差急骤上升, 故通过两个量之差求被测量的方法应尽量少用。

例: 如图 1-13 测得第一支路电流 I_1 和总电流 I 分别为

$$I = 30 \text{ A} \quad \gamma = \pm 2\%$$

$$I_1 = 20 \text{ A} \quad \gamma = \pm 2\%$$

求 I_2 时可能的最大相对误差。

解: $I_2 = I - I_1 = 30 - 20 = 10 \text{ A}$

$$\gamma_2 = \frac{30}{10} \times 0.02 + \frac{20}{10} \times 0.02 = 0.10 = 10\%$$

$$\text{若 } I = 30 \text{ A} \quad \gamma = \pm 2\% \quad I_1 = 5 \text{ A} \quad \gamma = \pm 2\%$$

$$\text{则 } I_2 = 30 - 5 = 25 \text{ A}$$

$$\gamma_2 = \frac{30}{25} \times 0.02 + \frac{5}{25} \times 0.02 = 2.8\%$$

可见两量相差越小, 可能出现的相对误差越大

3. 被测量 y 为 n 个量的积

$$y = x_1^n \cdot x_2^m \cdot x_3^p \quad (1-35)$$

式中 x_1 、 x_2 、 x_3 为直接测得的已知量

n 、 m 、 p 为 x_1 、 x_2 、 x_3 的指数, 可能为整数、分数、正数或负数。

对上式两边取自然对数得

$$\ln y = n \cdot \ln x_1 + m \ln x_2 + p \ln x_3 \quad (1-36)$$

两边微分

$$\frac{dy}{y} = n \frac{dx_1}{x_1} + m \frac{dx_2}{x_2} + p \frac{dx_3}{x_3} \quad (1-37)$$

式中 $\frac{dy}{y}$ 、 $\frac{dx_1}{x_1}$ 、 $\frac{dx_2}{x_2}$ 、 $\frac{dx_3}{x_3}$ 分别为被测量和各量的相对误差。取最不利的情况即均取正值

$$\gamma_y = |n \gamma_1| + |m \gamma_2| + |p \gamma_3| \quad (1-38)$$

显然被测量为 n 个量之商时, 其情况与积的结论相同。因为 $y = \frac{x_1^n}{x_2^m} = x_1^n \cdot x_2^{-m}$ 时同样得

$$\gamma_y = |n \gamma_1| + |m \gamma_2| \quad (1-39)$$

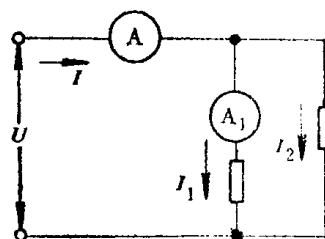


图 1-13