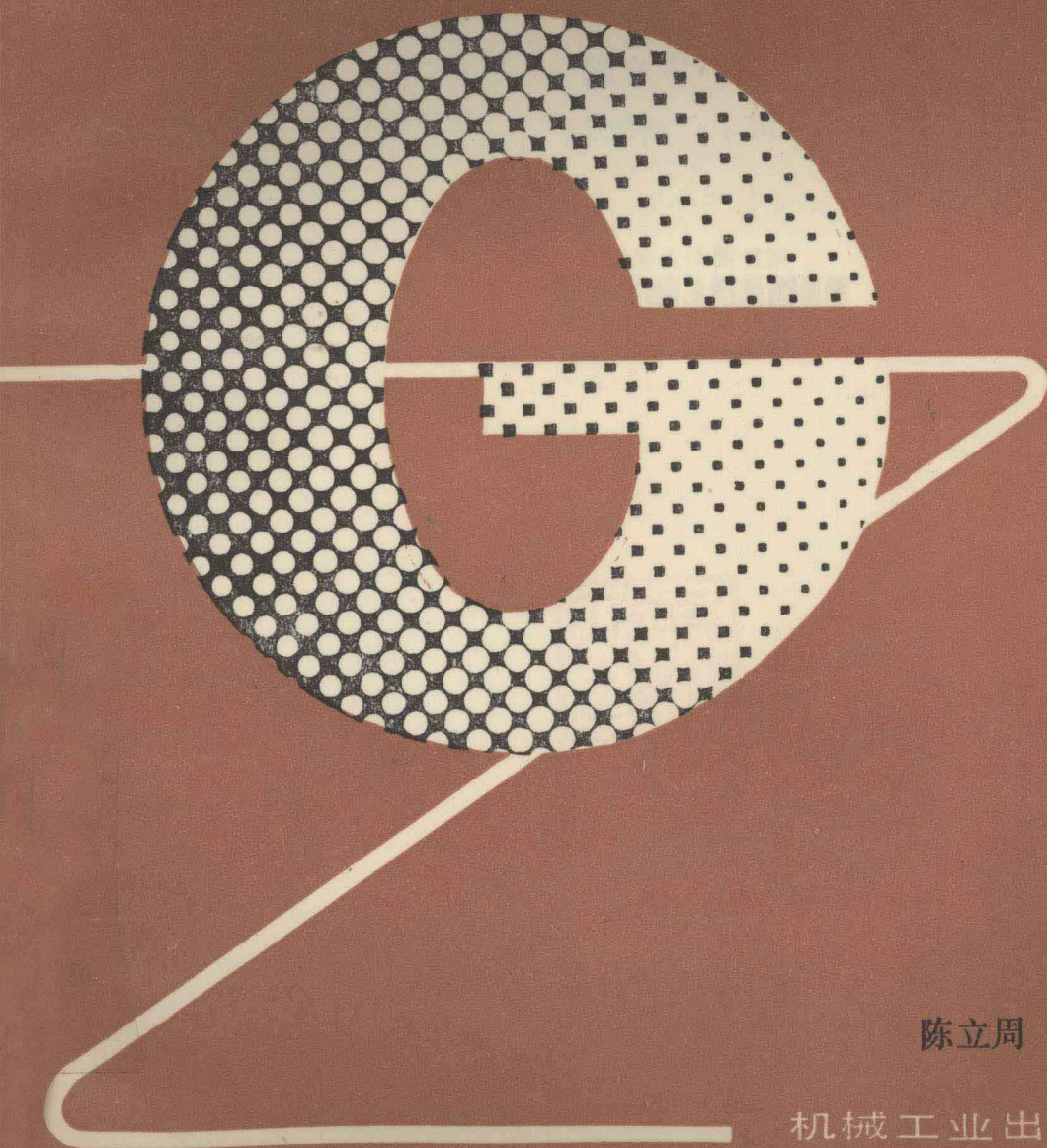


普通高等专科学校教育机电类规划教材

电气测量

(第2版)



陈立周 编

机械工业出版社

普通高等专科学校教育机电类规划教材

电气测量

(第2版)

陈立周 编

林存良 主审



机械工业出版社

前 言

本书是高等专科学校工业电气化和电机制造两个专业的教材，是在原《电气测量》试用教材基础上修订的。原书系1983年根据原机械工业部教育局审定的招收高中毕业生、学制为三年的教学大纲编写的，经过几年使用，各方面读者提出了许多宝贵意见，为适应教学改革和生产发展的需要，这次对原书进行了全面修订，修订后的教材同样也适用于职工大学、业余大学和专业培训。中等专业学校也可选用，并可供有关工程技术人员参考。

修订后全书仍分两篇，第一篇介绍电工测量仪表和基本电量的测量方法；第二篇介绍常用电子仪器即电子电压表和电子示波器的结构和使用。考虑到各校都已经增设有关自动检测方面的课程，修订本删除了有关非电量的电测量方面的内容。

1983年出版的原书是由当时哈尔滨电工学院袁禄明、福州大学林存厚两同志主审，这次修订本由福建机电学校林存良同志主审。在编写、修订和审稿中福州大学林永华、福建电子工业学校吴金福、福建邮电学校任汉金、福建机电学校陈志昌、王丕兰等同志提出了许多宝贵意见，仅向他们表示深切的感谢。

虽然经过修订，但书中难免还有不少错误和缺点，恳请广大读者在使用中提出宝贵意见。

编 者

1993年3月

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
第一节 测量方法的分类	1
第二节 电工仪表的分类	3
第三节 电工仪表的组成和基本原理	4
第四节 测量误差及其消除方法	8
第五节 工程上最大测量误差的估计	12
第二章 电流与电压的测量	17
第一节 电流与电压的测量方法	17
第二节 磁电系仪表	18
第三节 磁电系检流计	23
第四节 电磁系仪表	26
第五节 电动系仪表	31
第六节 测量用互感器	35
第七节 万用表	39
第八节 直流电位差计	47
第九节 电流表与电压表的使用与选择	50
第三章 功率和电能的测量	54
第一节 功率和电能的测量方法	54
第二节 电动系功率表	56
第三节 低功率因数功率表	60
第四节 三相功率的测量	61
第五节 感应系电度表及电能的测量	64
第六节 三相有功电度表	68
第七节 三相无功电度表和无功电能的测量	69
第四章 频率和相位的测量	72
第一节 频率的测量方法	72
第二节 电动系频率表	77
第三节 相位的测量方法	79
第四节 电动系相位表	81
第五章 电路参数的测量	85

第一节 电路参数的测量方法	85
第二节 直流单电桥	90
第三节 直流双电桥	92
第四节 交流阻抗电桥	97
第五节 变压器比率臂电桥	102
第六节 带电测温装置	105
第七节 兆欧表	107
第八节 接地电阻测量仪	111
第六章 磁的测量	114
第一节 概述	114
第二节 磁场的测量	115
第三节 磁性材料的测量	118

第二篇 常用电子仪器与测量方法

第七章 电子电压表	123
第一节 电子电压表的结构与特点	123
第二节 电子电压表的检波电路	125
第三节 电子电压表实例	131
第四节 电子电压表的使用	142
第五节 电子数字电压表	144
第六节 数字电压表实例	147
第八章 电子示波器	155
第一节 电子示波器的结构与原理	155
第二节 示波管	156
第三节 示波器的电源	161
第四节 示波器的Y通道	164
第五节 示波器的X通道	169
第六节 通用示波器的典型电路	173
第七节 示波器的应用	198
第八节 描绘特性曲线的专用示波器	204
附录一 习题	210
附录二 参考实验	215
附录三 电测量指示仪表和附件的符号	218
参考文献	222

第一篇 电工仪表与测量

电测量主要指电流、电压、电功率、电能、相位、频率、电阻、电感、电容以及电路时间常数和介质损耗等基本电学量和电路参数的测量。磁测量则主要指对磁场强度、磁感应强度、磁通量、磁导率、介质的磁滞损耗和涡流损耗等基本磁学量和介质磁性参数的测量。电测量和磁测量统称为电磁测量或电气测量。

电磁测量技术研究各种电磁量的测量方法、测量中所应配置的仪器设备、各种仪器设备的结构与原理、测量时的操作技术以及如何根据所测出的数据进行处理以求出测量结果和测量误差。

掌握电磁测量技术对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、运行、维修，还是对电气产品进行检验、分析、鉴定，都会遇到有关测量方面的技术问题。本篇主要介绍利用电工仪表对各种电磁量进行测量的原理和方法。

第一章 电工仪表与测量的基本知识

第一节 测量方法的分类

测量过程实际上是一个比较的过程。测量的任务就是通过实验的方法，将被测量（未知量）与标准单位量（已知量）进行比较，以求得被测量的值。电磁测量也是一样，也是通过直接或间接的方法，将被测的电磁量与同类的标准单位量进行比较，以确定被测电磁量的大小。标准单位量的实体称为度量器，度量器就是测量单位或测量单位分数、整数倍的复制体。例如标准电池、标准电阻、标准电感等。度量器又根据它在量值传递中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由国家计量部门管理，我们日常所用的度量器都属于工作量具。

测量既然是一种比较，当然可以采用不同的方式方法。按照测量结果如何取得形成了不同的测量方式。又根据测量数据如何读取，度量器是否直接参与，形成了不同的测量方法。测量的方式和方法可分成以下几种类型。

一、测量方式分类

1. 直接测量

直接测量是指被测量与度量器直接在比较仪器中进行比较，或者使用事先已刻有被测量单位的指示仪表进行测量，从而求得被测量的数值。这种方式的特点是测出数值就是被测量本身的价值，例如用电流表测量电流，用电桥测量电阻等，都是直接测出电流或电阻的值。

2. 间接测量

如果被测量不便于直接测量；或者直接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，先测出被测电阻两端的电压和通过该电阻的电流，然后再利用欧姆定律，间接计算出电阻数值。

3. 组合测量

如果被测的未知量与某个中间量的函数关系式中还有其他未知数，那么对中间量的一次测量还无法求得被测量的值，这时可以通过改变测量条件，测出不同条件下的中间量数值，写出方程组，然后通过解联立方程组求出被测量的数值，这种方式称为组合测量。组合测量也适用于同时测量一个函数式中的多个被测量。

例如要测量电阻温度系数 α 和 β ，必须在不同温度条件下，分别测出 20°C 、 t_1 、 t_2 三种不同温度时的电阻值 R_{20} 、 R_{t_1} 、 R_{t_2} ，然后通过解联立方程，求得 α 和 β 的值

$$R_{t_1} = R_{20}[1 + \alpha(t_1 - 20^\circ\text{C}) + \beta(t_1 - 20^\circ\text{C})^2] \quad (1-1)$$

$$R_{t_2} = R_{20}[1 + \alpha(t_2 - 20^\circ\text{C}) + \beta(t_2 - 20^\circ\text{C})^2] \quad (1-2)$$

若式中 t_1 、 t_2 、 R_{20} 、 R_{t_1} 、 R_{t_2} 为已知，将这些值代入上式，即可求出 α 和 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，不论是被测量还是中间量，读取它们数据的方法可分为直读法和比较法两种。

1. 直读法

用电测量指示仪表直接读取被测量数值的方法称为直读法。直读法的特点是没有度量器参与。实际上指示仪表进行刻度时仍需要度量器，也可能指示仪表刻度时并不借助度量器，而是利用标准的指示仪表进行，但标准仪表本身还是需要通过度量器刻度。所以直读法实际上是一种与度量器进行间接比较的方法，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

这种方法是将被测量与度量器置于比较仪器上进行比较，从而读出被测量的数值。为了保证测量结果的准确度，要求测量时保持较严格的实验条件，如温度、湿度、振动、外界电磁干扰等都不能超过规定值。根据被测量与标准量比较时的具体特点，比较法又分为三种。

(1) 零值法 被测量与已知量进行比较时两种量对仪器的作用相消为零的方法称为零值法。例如用电桥测电阻，具体电路如图1-1所示，当调节电阻 R_0 ，使电桥公式 $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0$ 保

持恒等时，指零仪表 P 的读数为零。被测电阻 R_x 可由 R_1 、 R_2 、 R_0 值求得。由于比较中指示仪表只用于指零，所以仪表误差并不影响测量结果的准确度，测量准确度只与度量器及指示仪表灵敏度有关。天平测重量就是一种零值法的实例。

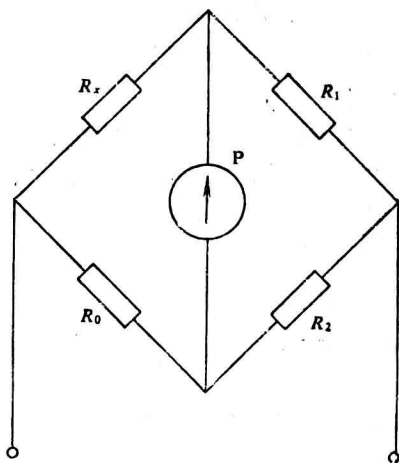


图1-1 零值法测电阻

(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。例如用电位差计测量电池的电动势值 E_x , 如图1-2所示。图中 E_0 为已知量,是标准电池的电动势,在这里作为度量器。电位差计可以测出被测量 E_x 与已知量 E_0 的差值 δ , 然后根据 E_0 和差值 δ 求得被测量 E_x 。

$$E_x = E_0 + \delta \quad (1-3)$$

通常差值 δ 仅仅是被测量的很小一部分,例如 δ 为 E_x 的1/100, 如果差值 δ 在测量中产生1/1000的误差,那么反映到被测量 E_x 中,产生的误差仅为1/10⁵。

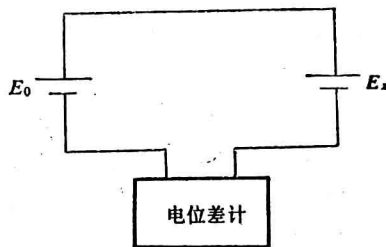


图1-2 较差法测电动势

(3) 替代法 替代法是将被测量与已知量先后两次接入同一测量装置,如果两次测量中测量装置的工作状态保持不变,则认为替代前接在装置上的已知量,与替代后的已知标准量其数值完全相等。当然要做到完全替代,已知标准量最好是连续可调的,这样才能通过调节使测量装置的工作状态保持不变。

采用这种方法,如果前后两次测量相隔的时间很短,而且又是在同一地点进行,那么装置的内部特性和各种外界因素对测量所产生的影响可以认为完全相同或绝大部分相同,所以测量误差极小,准确度几乎完全取决于标准量本身的误差。

第二节 电工仪表的分类

测量各种电磁量的仪器仪表,统称为电工仪表。电工仪表不仅可以测量电磁量,还可以通过各种变换器来测量非电磁量,例如温度、压力、速度等等。它应用广泛,品种规格繁多,但归纳起来,基本上可以分为三大类。

一、指示仪表

指示仪表是最常见的一种电工仪表。它的特点是把被测电磁量转换为可动部分的角位移,然后根据可动部分的指针在标尺上的位置直接读出被测量的数值。所以它是一种直读式仪表,如交直流电压表、电流表、功率表等。指示仪表又可以按不同分类方法分为以下几种类型:

- 1) 按准确度等级分类,可分为0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0七个等级。
 - 2) 按使用环境条件分类,可分为A、A₁、B、B₁、C五种组别。
 - 3) 按外壳防护性能分类,可分为普通、防尘、防溅、防水、水密、气密、隔爆等七种型式。
 - 4) 按仪表防御外界磁场或电场影响的性能分类,可分为I、II、III、IV四个等级。
 - 5) 按读数装置的结构方式分类,可分为指针式、光指示式、振簧式、数字转盘式(如电度表)等。
 - 6) 按使用方式分类,可分为安装式、可携式等。
 - 7) 按工作原理分类,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、耐受机械力作用的性能或测量对象进行分类。
- 指示仪表是电工仪表中生产批量最大的一种产品,其结构已经达到相当完善的程度,所

以近年来产品形式没有什么重大突破,仍停留在60年代传统的水平上。只有部分产品开始应用电子技术,例如采用电子器件组成变换器,配合磁电系仪表实现对交流功率、频率、相位的测量。这种变换式仪表大大简化了仪表的配套生产工艺,提高了单一品种表芯的产量,达到了降低成本、方便维修的目的。又例如采用半导体二极管可制成一种额定值扩展标尺的指示仪表,使它的机械零点不为0,例如可制成320~400V的电压表。

二、数字仪表

数字仪表也是一种直读式仪表,它的特点是把被测量转换为数字量,然后以数字方式直接显示出被测量的数值。由于这种仪表是采用数字技术,因此如果再与微处理器配合,可以在测量中实现自动选择量程、自动存贮测量结果、自动进行数据处理及自动补偿。数字仪表在测量速度和精度方面都超过指示仪表,但它缺乏指示仪表那种良好的模拟直观性,所以观察者与仪表稍有距离就可能看不清所显示的数值。而指示仪表只要能看到指针,就能大体判断出被测量的数值。为此近期也出现数字与指针相结合的指示方式,这种仪表既属于指示仪表,又是数字仪表。

测量各种电磁量的数字仪表,一般按被测对象分类,例如分为数字频率表、数字电压表、数字欧姆表、数字功率表等等。

三、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,以及直流电流比较仪等。

比较法测量的准确度都比较高,所以比较仪器可用于对电磁量进行较精密的测量的场合。

电工比较仪器通常分为直流和交流两大类,每类中包括比较仪器本体(如电桥、电位差计等)、检流设备、度量器等。

第三节 电工仪表的组成和基本原理

一、指示仪表的组成和基本原理

电磁测量用的指示仪表结构方框图如图1-3所示,可以看出指示仪表可划分为测量线路和测量机构两大部分。

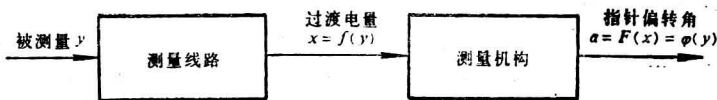


图1-3 电测量指示仪表方框图

测量线路的任务是把被测量 y 转换为可被测量机构接受的过渡量 x 。测量机构的任务则是把过渡量 x 再转换为指针角位移 α 。不论是测量线路中的 y 和 x , 还是测量机构中的 x 和 α , 都要求它们之间保持一定的函数关系, 这样才能从角位移 α 读出被测量 y 。至于选用何种电磁量作为过渡量, 则要看使用什么类型的仪表, 例如使用磁电系仪表, 要用电流作为过渡量, 而使用静电系仪表, 则要用电荷量作为过渡量。因此要根据测量机构和测量对象的不同, 选用适当的测量线路, 使它能在测量对象作用下, 产生适合测量机构的过渡量。当然如

果测量对象能够直接作用于测量机构，也可以不用测量线路，例如用磁电系仪表测量直流电流，如果量程相当，就不必用测量线路。

测量机构是指示仪表的核心，它与测量线路不同，任何情况都不能省略，没有测量机构就不能构成指示仪表。测量机构通常由固定、可动两部分组成，以磁电系为例，磁路为固定部分，动圈、指针、游丝组成可动部分。测量机构也可以按元件功能区分，即包括如下三部分。

1. 产生转动力矩M的驱动装置

为了使指针能够偏转就需一个能产生转动力矩M的装置。不同类型的仪表，产生转动力矩的原理不同，产生力矩的构造也不同，例如磁电系仪表是利用通电线圈与永久磁铁之间的电磁力，而静电系仪表则是利用两块极板间的电场作用力。

各种指示仪表的转动力矩，除了与固定部分及可动部分所形成的电磁场强弱有关外，还跟电磁场的分布状态有关。一般地说，电磁场的强弱由被测量的大小决定，而分布状态则与可动部分所处的位置有关。所以指示仪表的转动力矩一般要受两个因素影响，也就是说它是被测量x与可动部分偏转角α的二元函数，即M = F(x, α)。只有个别仪表，例如磁电系仪表，因为其气隙中的磁场十分强，可动线圈的位置不影响磁场的分布情况，所以它的转动力矩是被测量x的单变量函数，也是M = F(x)。

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力矩，而没有控制装置，那么不论被测量x所产生的转动力矩是大还是小，可动部分总要在它的作用下一直偏转到尽头。就象一杆不挂秤砣的秤杆，不论被称的重量多大，总是向上翘起。

为了使可动部分的偏转角能反映被测量的大小，所以还需要设置一个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，游丝是由高弹性材料制成的。扭紧时就会产生一个与转动力矩方向相反的反作用力矩，在弹性范围内，其大小与游丝扭转角成正比，即

$$M_a = D\alpha \quad (1-4)$$

式中 D——反作用力矩系数，由游丝的材料与外形所决定；

α——可动部分的偏转角。

这样，仪表可动部分受转动力矩驱动产生偏转的同时，又受到反作用力矩作用，偏转角度越大，反作用力矩也越大，当反作用力矩与转动力矩相等时，可动部分就停止，这时对应的偏转角α可按下式推得

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

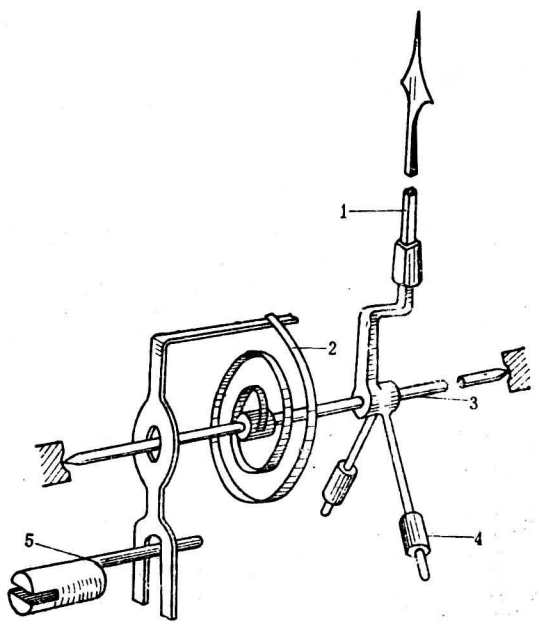


图1-4 用弹簧游丝产生反作用力矩
1—指针 2—游丝 3—轴 4—平衡锤 5—调零器

设转动力矩 $M = F(x)$ 代入式 (1-4) 及式 (1-5) 得

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

$$\alpha = \frac{F(x)}{D} \quad (1-6)$$

如用图形表示, 则如图1-5所示。其中转动力矩 M 是被测量 x 的函数, 如果 M 与可动部分偏转角 α 无关的话, 它就是一组与 α 坐标轴平行的直线。而 M_s 与 α 成正比, 所以反作用力矩是一条向上倾斜的直线。 M 与 M_s 的交点就是可动部分平衡点。对应的 α 就是可动部分停止的位置, 例如图中当转动力矩分别为 M 、 M' 、 M'' 时, 对应的偏转角为 α 、 α' 、 α'' 。

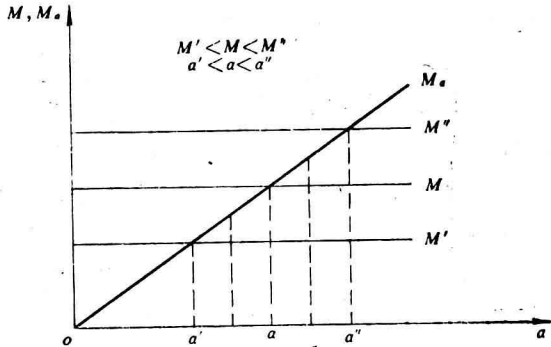


图1-5 转动力矩、反作用力矩与偏转角的关系

从图中还可以看出, 当外界因素 (如振动) 使可动部分从平衡位置 α 处偏移, 这时 $M \neq M_s$, 从而产生差力矩 $M - M_s$, 这个力矩又称为定位力矩 M_d , 即

$$M_d = M - M_s \quad (1-7)$$

定位力矩力图将仪表可动部分返回到原来的平衡位置, 但由于轴尖与轴承间总是存在摩擦力, 可动部分总是无法回到原来平衡点, 从而造成仪表的示数误差, 这种误差又称为摩擦误差, 它是仪表基本误差的一部分。通常要通过提高反作用力矩系数 D 或者减轻可动部分的重量, 也就是增加定位力矩减少摩擦力矩来消除摩擦误差。

产生反作用力矩, 除了用游丝外, 还可以用张丝、重锤或电磁力矩 (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, 可动部分在转动力矩的作用下, 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, 到达平衡位置时, 不可能立即停止, 往往超过平衡点, 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左右摆动。

为了尽快读数, 必须在测量机构中设置吸收这种振荡能量的装置, 这种装置称为阻尼装置。阻尼装置可以产生与可动部分运动方向相反的力矩, 即阻尼力矩。

应该指出, 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, 可动部分运动时带动阻尼翼片在一个密封的阻尼箱中运动, 利用空气对翼片的阻力产生阻尼力矩, 它的结构如图 1-6 a 所示。另一种是电磁感应阻尼器, 可动部分带动一个金属阻尼片, 使之切割阻尼磁场的磁力线而在片上感应涡流, 这个涡流与磁场产生的电磁力矩就是阻尼力矩。它的结构如图 1-6 b 所示。

此外, 还有采用油阻尼的, 但因其结构复杂, 多用于高灵敏度的张丝仪表中。

除以上三种产生力矩的装置外, 指示仪表的测量机构还包括指针、度盘、光指示式的光

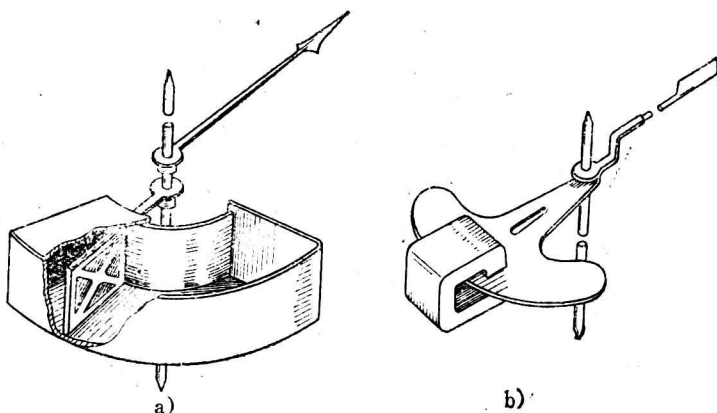


图1-6 阻尼器

a) 空气阻尼器 b) 磁感应式阻尼器

路系统和刻度尺、调零器、平衡锤、止动器以及外壳等。

二、数字仪表的组成和基本原理

电磁测量用的数字仪表典型结构如图1-7所示，它包括测量线路、模数转换(A/D转换)和数字显示几个部分。

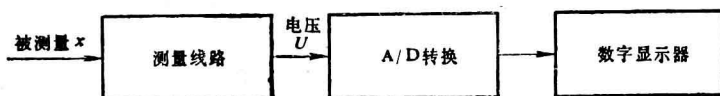


图1-7 数字仪表组成方框图

测量线路的任务是将被测模拟量转换为便于进行模数转换的另一种模拟量(即中间量)，由于现在实际使用的A/D转换器只能将直流电压转换为相应数字量，所以现在的测量线路实际上都是把被测模拟量转换为直流电压。

在指示仪表中转换出来的中间量 y 只要能与被测量 x 保持一定的函数关系，即 $y = F(x)$ 即可。如果 $y = F(x)$ 不是线性函数，可以通过非线性的标尺刻度来解决。而数字仪表则要求转换后的中间量必须与被测量保持线性，因为从中间模拟量开始，经A/D转换、显示电路都是线性关系，因此要求在测量线路中，中间过渡量必须与被测量保持线性，即 $y = kx$ ，式中 k 为常数。

A/D转换器的任务是把模拟量转换为数字量。所谓模拟量是指一种连续的量，其数值连续可变，且随时间连续变化。大部分物理量都属于模拟量。数字量则是不连续的量，只能一个单位一个单位地增加或减少，而且在时间上也不连续，例如开关通断、脉冲个数等。现在的A/D转换通常是把连续变化的直流电压转换为高电平或低电平脉冲所组成的二进制数码。

如果被测量本身已经是一种数字量，例如频率(即交流电压每秒变化次数)本身就是数字量，就无须经过模数转换这个环节。

数字显示是把转换后的数字量用数码形式显示出来。显示器可以是数码管、指示灯或其他显示器件。常用的数码管可直接显示并行的二进制电信号。如果是串行的电脉冲信号，则先用计数器进行计数，计数后的信号即为并行信号。

原则上所有电工仪表都可以做成数字仪表，由于数字仪表以数字形式显示，没有机械转动部分，因此可以避免摩擦、读数等误差，当生产过程采用计算机控制时，数字仪表也便于与计算机配合。

第四节 测量误差及其消除方法

一、测量误差的分类

不论采取何种测量方式，也不论是用何种仪器仪表，由于仪表本身不可能绝对准确，加上测量方法、实验者本人经验、以及人感官的条件限制等方面的原因，都会使测量产生误差，测量误差可以分成三种类型。

1. 系统误差

系统误差是指在相同条件下，多次测量同一个量时，误差大小和符号均保持恒定，或按某种规律变化（例如有规律地逐渐增大或周期性增大和减小）的一种误差。系统误差总是由某个特定的原因引起的，而且这种原因总是持续存在而不是偶发的，按其产生的原因又可分为：

（1）基本误差 基本误差是指仪表在规定的工作条件下，即在规定的温度、湿度、放置方式、外界电场和磁场干扰等条件下，由于仪表本身结构不完善而产生的一种固有误差，例如转动部分的摩擦、刻度不准、轴承与轴尖的间隙所造成可动部分的倾斜等等。

（2）附加误差 附加误差是指仪表使用时偏离规定的工作条件而造成的误差，例如温度过高、波形非正弦、外界有电磁场干扰等。

2. 偶然误差

偶然误差又称为随机误差，它是由偶发原因出现的一种大小、方向都不确定的误差。这种误差没有什么规律也难以预计，但从其总体来讲却服从统计规律。例如由于环境因素的突然变化、测量人员感官的某种缺憾所造成的误差。

3. 疏忽误差

这是一种由测量人员的粗心疏忽造成的严重歪曲测量结果的误差，例如读数错误、记录错误等。

二、测量误差的表示方法

测量误差的表示方法有三种。

1. 绝对误差

用测量值 A_x 与被测量真值 A_0 之间的差值所表示的误差称为绝对误差，即

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-8)$$

绝对误差的单位与被测量的单位相同，误差符号可能为正，也可能为负，如用电压表测电压，读数为201V，而用标准表测出的值则为200V，若认为标准表的读数为真值，则绝对误差为

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

2. 相对误差

绝对误差 Δ 与被测量真值 A_0 之比称为相对误差，即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-9)$$

由于被测量的测量值与真值相差不大，上式中的 A_0 也可用 A_x 代替，即相对误差表示为

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (1-10)$$

绝对误差固然比较直观，可以直接看出误差的绝对数值，但很难用它判断测量结果的准确程度。

例 用一电压表测量200 V电压时，其绝对误差为+1 V。用另一电压表测量另一电压读数为20 V时，绝对误差为+0.5 V。求它们的相对误差。

解：

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

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

可见前者的绝对误差大于后者，但误差对测量结果的影响，后者却大于前者。衡量误差对测量结果的影响，通常用相对误差更加确切。

3. 引用误差

以绝对误差 Δ 与仪表上量限 A_n 的比值所表示的误差称为引用误差，用 γ_n 表示为

$$\gamma_n = \frac{\Delta}{A_n} \times 100\% \quad (1-11)$$

由于仪表在不同刻度点的绝对误差略有不同，因此取可能出现的最大绝对误差 Δ_n 与仪表上量限（即满度值） A_n 之比称为最大引用误差，即

$$\gamma_n = \frac{\Delta_n}{A_n} \times 100\% \quad (1-12)$$

仪表的准确度与仪表本身结构有关。一般测量时的绝对误差在仪表标尺的全长范围内基本保持不变，而相对误差却随着被测量的减少而逐渐增大，而且有可能增至无限大，所以相对误差可以用来说明测量结果的准确程度，却不能说明仪表本身的优劣。最大引用误差的公式(1-12)中的分子分母都由仪表本身性能所决定，所以最大引用误差可以用来评价仪表性能。实用中就用它表征仪表准确度等级。

三、误差的消除方法

1. 系统误差的消除方法

对于系统误差，不论是基本误差还是附加误差，最彻底的消除方法就是改进仪表的制造工艺，选择质量优良的元器件，加强各种屏蔽措施，防护外界环境对仪表的影响。但从根本上说，要做到无误差是不可能的，只能用某些补偿办法消除可能出现的误差。常用补偿方法有：

(1) 用比较法消除系统误差 在本章第一节已经讲过，差值法和零值法可以用来消除或减少指示仪表造成的系统误差，替代法不仅可以消除指示仪表的系统误差，而且可以消除

比较仪器造成的系统误差。

以电桥测电阻为例，在图1-8中，电桥平衡时可得

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3 \quad (1-13)$$

可见采用式(1-13)的零值法，可以消除指示仪表准确度对测量结果的影响，这时指示仪表只用于指零而不用于读数。但零值法不能消除桥臂电阻所产生的误差，若 R_1 、 R_2 、 R_3 的误差分别为 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 ，则测出的读数 R'_x 也将出现差值 ΔR_x ，即

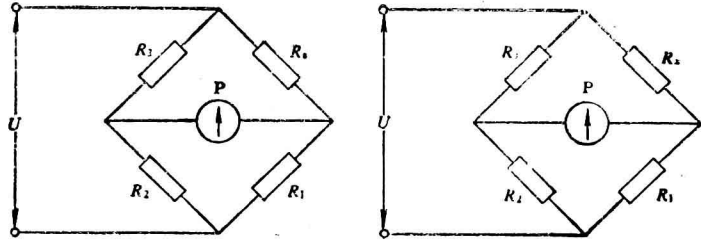


图1-8 用零值法和替代法测电阻

$$R'_x = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_2 + \Delta R_2} (R_3 + \Delta R_3) = R_x + \Delta R_x \quad (1-14)$$

如果采用替代法，即在不改变 R_1 、 R_2 、 R_3 的条件下，用一个标准电阻 R_s 代替 R_x ，也能使电桥平衡，则可认为

$$R_x = R_s \quad (1-15)$$

可见采用替代法时， R_x 只取决于 R_s ，因此指示仪表和比较电桥各桥臂电阻所造成的误差都可以得到消除。

(2) 用正负误差补偿法消除系统误差 这种方法是对同一被测量，反复测量两次，并想法使其中的一次误差为正，另一次为负，然后取其平均值，便可消除系统误差。

例如为了消除地磁场对仪表的影响，可以在一次测量之后，将仪表调转 180° ，重新再测一次，前后两次地磁场对仪表的影响方向相反，取其平均值，这种误差也就消除了。

(3) 利用校正值求得被测量的真值 在精密测量中，常常使用这种校正的办法。校正值是被测量真值 A_0 与仪表实际读数 A_x 之差。用 δ 表示则

$$\delta_r = A_0 - A_x \quad (1-16)$$

可见校正值在数值上等于绝对误差，但符号相反。如果在测量之前能预先对所用仪表的各个刻度求出校正值，或者制成校正曲线或校正表，那么测量时就可以从仪表读数和对应的校正值求得被测量的真值，即

$$A_0 = A_x + \delta_r \quad (1-17)$$

图1-9表示某一电流表的校正曲线，如果测量时的读数为 3.5 A ，从图中可查出其校正值为 $+0.13\text{ A}$ ，可求得被测值为

$$\begin{aligned} A_0 &= A_x + \delta_r \\ &= 3.5\text{ A} + 0.13\text{ A} \\ &= 3.63\text{ A} \end{aligned}$$

2. 偶然误差的消除方法

偶然误差一般都比较小，只有在精密测量中，当系统误差已经采取各种措施加以消除之

后，偶然误差才不能忽略。

偶然误差就其个体而言，没有什么规律。但多次测量出现的偶然误差却有以下特征：第一，在一定条件下，偶然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绝对值大的误差，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相等，即所谓对称性。如果用 δ 表示误差值，用 f 表示这种误差值出现的次数，则可画出偶然误差的正则分布曲线如图1-10所示。

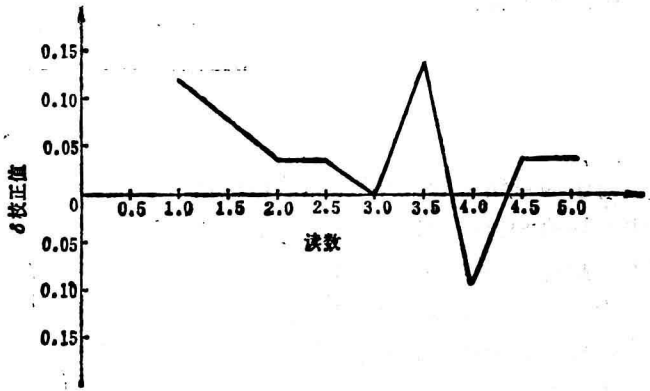


图1-9 校正曲线

根据偶然误差这些特点，精密测量时可以通过多次的反复测量，求出其算术平均值，并用它作为被测量的真值，从而消除单次测量可能存在的偶然误差，即

$$A_0 = \bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad (1-18)$$

式中 \bar{A} ——算术平均值，
 n ——测量次数。

用这种方法消除偶然误差，其测量次数必须足够多，如果次数不足， \bar{A} 与 A_0 仍然可能有偏离，其偏离程度可以用标准差 σ_x 表示，即

$$A_0 = \bar{A} \pm \sigma_x \quad (1-19)$$

根据概率论原理，标准差可以从均方根误差 σ 或者从剩余误差 V_i 的值求出

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2}{n(n-1)}} \quad (1-20)$$

式中 σ ——均方根误差，设每次测量值与真值之差称为随机误差或写成 $\delta_i = A_x - A_0$ ，取每次 δ_i 的均方根值即等于均方根误差，即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2}{n}} \quad (1-21)$$

V_i ——剩余误差，它等于每次测量值与算术平均值之差，即

$$V_i = A_x - \bar{A} \quad (1-22)$$

从式 (1-20) 中可以证明

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

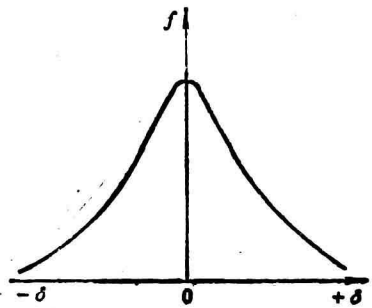


图1-10 偶然误差正则分布曲线

例 对某一电压进行15次测量, 求得其算术平均值为20.18 V, 若计算出它的均方根误差 $\sigma = 0.34 \text{ V}$, 则该电压真值可能为多大?

解: 先求得标准差

$$\sigma_x \approx \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \approx \frac{0.34 \text{ V}}{\sqrt{15}} = 0.09 \text{ V}$$

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

对于测量结果的上述表达式可以这样理解, 被测电压真值不知道, 但可用由测量求得的算术平均值20.18 V来代表它, 在这20.18 V中含有偶然误差, 其标准差为0.09 V, 但无论如何不会超过 $3 \times 0.09 \text{ V} = 0.27 \text{ V}$ 。

由于真值不知道, 例中的均方根误差 σ 不能按式(1-21)求出, 而应按式(1-20)求。

现在常用的电子计算器都有计算算术平均值和均方根误差值的按键, 利用它计算偶然误差也十分方便。

3. 疏忽误差的剔除方法

疏忽误差是人为原因造成的, 所以不存在“消除”的问题, 而是在发现后加以剔除。一般在测量数据中, 凡是其剩余误差大过均方根误差3倍以上的数据, 即 $(A_i - \bar{A}) > |3\sigma|$ 的都认为是属有疏忽误差的数据, 应予以剔除。例如上例中凡剩余误差 V_i 大于0.27 V的数据, 都应剔除。但应注意, 剔除了有疏忽误差的数据后, 应重新计算算术平均值, 重新计算每个数据的均方根误差, 并重新判断剩下的数据中是否有疏忽误差, 直至全部数据的 $A_i - \bar{A}$ 值不超过 3σ 为止。

第五节 工程上最大测量误差的估计

反映测量结果与真值(或者是标准比较值)接近程度的量称为精度。精度愈高, 测量误差愈小。所以精度在数值上可以用相对误差倒数表示, 例如测量的相对误差为0.1%, 其精度可定为 $\frac{1}{10^{-3}} = 10^3$ 。

精度又分为精确度、准确度、精密度。在误差理论中, 准确度是表征系统误差的大小程度。系统误差愈大, 准确度就愈低。精密度是表征偶然误差的大小程度, 所以测量的准确度很高, 不一定精密度也很高。相反亦然。精确度则指系统误差和偶然误差的综合结果, 如精确度很高, 则指系统误差和偶然误差均很小。

由于偶然误差一般都比较小, 所以只有进行精密测量或精密实验中才予以考虑, 而在一般工程测量时往往略而不计, 只考虑测量中的系统误差。换句话说: 工程测量只注意测量中的准确度, 而不考虑精密度。估计工程测量可能产生的误差, 也只要考虑系统误差。

一、直接测量方式的最大误差

用指示仪表进行直接测量, 可以根据仪表的准确度等级, 估计可能产生的最大误差。指示仪表的准确度等级用最大引用误差表示, 例如最大引用误差为1%, 则定该仪表的准确度等级为1级, 若最大引用误差为 γ_n , 则准确度等级为 K , 有

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

式中 K ——仪表准确度等级；

γ_m ——最大引用误差；

Δ_m ——最大绝对误差；

A_m ——仪表的上量限。

直接测量时可能出现的最大绝对误差和相对误差分别为

$$\Delta_m = \pm K \cdot A_m \quad (1-25)$$

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

可见测量结果的准确度并不等于仪表准确度等级，测量结果可能出现的相对误差既与仪表准确度等级有关，也与仪表上量限 A_m 及实际被测值 A_x 有关。被测值越接近满度，其相对误差越小。

另外，准确度等级 K 所表示的最大引用误差是在正常使用条件下得出的，如果测量时不能满足规定的工作条件，那么系统误差应包括以准确度等级 K 所表示的基本误差，再加上工作条件变化时的附加误差。

例 用最大量限为30 A，准确度等级为1.5级的安培表，在规定工作条件下测得某电流为10 A，求测量时可能出现的最大相对误差。

解：
$$\gamma = \pm \frac{0.015 \times 30 \text{ A}}{10 \text{ A}} \times 100\% = \pm 4.5\%$$

二、间接测量方式的最大误差

1. 被测量 y 为 n 个量之和

设 x_1 、 x_2 、 x_3 为与被测量有关的中间量，被测量 y 为 x_1 、 x_2 、 x_3 之和，即

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

若测量 x_1 、 x_2 、 x_3 时的绝对误差为 Δx_1 、 Δx_2 、 Δx_3 ，被测量 y 将产生的绝对误差为 Δy ，则

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

将式 (1-27) 和式 (1-28) 相减得

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

两端除以 y 得

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x_1}{y} + \frac{\Delta x_2}{y} + \frac{\Delta x_3}{y} \quad (1-30)$$

我们感兴趣的是求出被测量 y 的最大相对误差，显然它是出现在各个量 x 的相对误差为同一符号的情况，设 γ_y 表示测量中最大相对误差，则

$$\begin{aligned} \gamma_y &= \left| \frac{\Delta x_1}{y} \right| + \left| \frac{\Delta x_2}{y} \right| + \left| \frac{\Delta x_3}{y} \right| \\ &= \left| \frac{x_1}{y} \gamma_1 \right| + \left| \frac{x_2}{y} \gamma_2 \right| + \left| \frac{x_3}{y} \gamma_3 \right| \end{aligned} \quad (1-31)$$

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

例 用安培表测量图1-11各支路电流，其中第一支路为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。