



普通高等教育电气电子类工程应用型“十二五”规划教材

电工仪表及测量

主 编 周启龙



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

013046853

TM93-43

34

普通高等教育电气电子类工程应用型“十二五”规划教材

电工仪表及测量

主 编 周启龙

副主编 王立地

参 编 吴仕宏 刘恒赤 杨 薇 孟晓芳 周志巍



机械工业出版社

TM93-43

34



北航

C1652584

828330810

本教材是根据最新的教学大纲编写的。本教材主要包括：测量与电工仪表的基本知识、磁电系仪表、电磁系仪表、电动系仪表与功率测量、感应型电能表与电能测量、数字式仪表、智能电能表、电气测量常用的其他几种仪表、电测量指示仪表的选择与校验等内容。

本书通俗易懂、深入浅出、实践性强，不但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的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工仪表及测量 / 周启龙主编. — 北京: 机械工业出版社, 2013. 6
普通高等教育电气电子类工程应用型“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-42202-0

I. ①电… II. ①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. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 077102 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王雅新 责任编辑: 王雅新

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈 越

封面设计: 张 静 责任印制: 张 楠

北京玥实印刷有限公司印刷

2013 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 11 印张 · 267 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-42202-0

定价: 24.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

本教材是根据最新的教学大纲编写的。本教材适用于各类电气专业的学生学习使用，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和电工仪表的基本知识，并重点介绍了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。内容包括：磁电系仪表、电磁系仪表、电动系仪表和感应型电能表，以及应用这些仪表测量相关电气参数的测量电路、测量过程和测量原理，并介绍了数字式仪表的基本组成原理、智能电能表的组成原理、电测量指示仪表的选择与校验原理及方法等。本教材注重理论联系实际、注重实际应用仪表和实际应用电路，内容安排深入浅出、便于自学。

参加本教材编写的单位有沈阳农业大学、河北农业大学、山西农业大学和沈阳供电公司，参加编写的人员有周启龙、王立地、吴仕宏、刘恒赤、杨薇、孟晓芳、周志巍，全书由周启龙教授统稿，由朴在林教授主审，感谢主审老师的认真工作。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请广大读者批评指正。同时对参考文献的作者表示感谢。

作 者

目 录

前言

第1章 测量与电工仪表的基本知识 1

- 1.1 测量的基本知识 1
- 1.2 电工仪表的分类 4
- 1.3 电工仪表的组成和基本原理 4
- 1.4 电工仪表的误差和准确度 7
- 1.5 电工仪表的主要技术性能 9
- 1.6 测量误差及其消除方法 10
- 1.7 工程上最大测量误差的估算 12
- 1.8 电工仪表的表面标记和型号 16
- 思考题 18

第2章 磁电系仪表 20

- 2.1 磁电系仪表的结构和工作原理 20
- 2.2 磁电系电流表 23
- 2.3 磁电系电压表 28
- 2.4 万用电表 29
- 思考题 33

第3章 电磁系仪表 35

- 3.1 电磁系仪表的结构和工作原理 35
- 3.2 电磁系仪表的误差及防御措施 40
- 3.3 电磁系电流表和电压表 42
- 3.4 电磁系仪表的常见故障及其消除方法 43
- 思考题 44

第4章 电动系仪表与功率测量 45

- 4.1 电动系测量机构 45
- 4.2 电动系电流表和电压表 47
- 4.3 电动系功率表 49
- 4.4 三相交流电路中有功功率的测量 55
- 4.5 三相交流电路中无功功率的测量 59
- 思考题 61

第5章 感应型电能表与电能测量 62

- 5.1 感应型电能表的结构和工作原理 62

- 5.2 电能表的调整 70

- 5.3 外界因素对电能表的影响 74

- 5.4 无功电能表及无功电能计量 77

- 5.5 测量用互感器 83

- 5.6 有功电能表的正确接线 87

- 5.7 电能表的错误接线 92

- 思考题 95

第6章 数字式仪表 97

- 6.1 数字万用表 97

- 6.2 数字功率表 111

- 6.3 数字式电能表 118

- 思考题 120

第7章 智能电能表 121

- 7.1 智能电能表的硬件结构 121

- 7.2 智能电能表的软件与算法 124

- 7.3 智能电能表的网络通信技术 126

- 7.4 智能电能表的功能及其发展 130

- 思考题 131

第8章 电气测量常用的其他几种

仪表 132

- 8.1 相位表和频率表 132

- 8.2 直流电位差计 136

- 8.3 绝缘电阻表和接地电阻测量仪 138

- 8.4 直流电桥和交流变比电桥 143

- 思考题 147

第9章 电测量指示仪表的选择与

校验 148

- 9.1 电测量指示仪表的技术特性比较 148

- 9.2 电测量指示仪表的选择 149

- 9.3 电流表和电压表的校验 153

- 9.4 功率表和电能表的校验 157

- 思考题 168

参考文献 169

第1章 测量与电工仪表的基本知识

人们在工农业生产、科学研究、商品贸易和日常生活中都离不开测量。通过测量可以定量地认识客观事物，从而达到逐步深入地掌握事物的本质和揭示自然界规律的目的。英国的一位物理学家曾经说过：“每一件事只有当可以测量时才能被认识。”由此可以看出测量的重要意义。

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，并采取相应的调节和控制手段，保证系统安全和经济地运行。因此，人们常常把电工仪表和测量叫做电力工业的窗口和脉搏。因为在电气设备的安装、调试、试验、运行和维修中，以及对电气产品进行检验、测试和鉴定中都会遇到电工仪表和测量方面的技术问题，所以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。

1.1 测量的基本知识

1.1.1 测量的定义

1. 测量

所谓测量，就是指用实验的方法，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。

这里应该注意，被测量与标准量应该是同类物理量，如用尺子量长度；也可以是能够被推算出被测量的等量的异类物理量，如用电流表测电流，电流表里找不到同类物理量，但游丝弹簧的弹力可以等效出电流单位的大小，因此也可以实现电流的测量。

2. 电工测量

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单位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标准量是被测量所用测量单位的实体体现或复制体，称为量具或度量器。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。

1.1.2 测量方法分类

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。直接测量的特点是，测出的数值就是被测量本身的值，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先测出电阻上的电压与通过电阻的电流,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,那么虽然被测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,因此对中间量的一次测量是不可能求得被测量的值的。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 $R_{20^{\circ}\text{C}}$ 、 R_{θ_1} 和 R_{θ_2} ,列出下列方程组:

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

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

求解式(1-1)、式(1-2)联立方程,从而可求得 α 、 β 的值。

4. 比较测量

比较测量是指将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。这种方法常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、振动和防电磁干扰等。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,比较测量又有三种方法:

(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,若被测电阻与已知电阻满足公式

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0$$

则这时指零仪读数为零,被测电阻值即可由 R_1 、 R_2 、 R_0 三个值求得。零值法测电阻如图1-1所示。由于零值法中电测量指示仪表只用于指零,因此仪表误差不会影响测量准确度,测量准确度只取决于已知电阻和指示仪表的灵敏度。使用天平测重量就是零值法的一个例子。

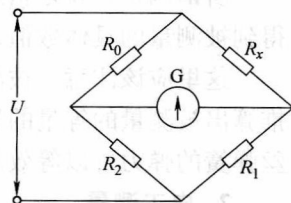


图 1-1 零值法测电阻

(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 $1/100$,如果测量差值 δ 时产生了 $1/1000$ 的误差,那么反映到被测量 E_x 中仅为 $1/100\,000$ 的误差。

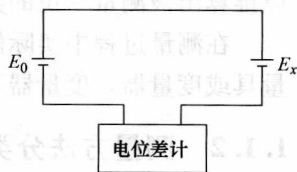


图 1-2 差值法测电动势

(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。由于测量仪器的状态不改变,内部特性和外界条件对前后两次测量的影响是相同的,因此这种方法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。曹冲称象就是替代法的一个例子。

1.1.3 测量的单位

正确的测量结果应该包括两部分：一部分是一个数字；另一部分是被测量的单位。例如，测量某电流 $I = 25\text{A}$ ，某长度 $L = 500\text{m}$ ，其中，25 和 500 是数字，A 和 m 是单位。一般，测量结果可表示成 $x = A_x x_0$ 。其中， x 是被测量， A_x 是数字值， x_0 是测量单位。 x_0 是非常重要的一个参数，它不仅能反映被测量的性质，而且对同一个被测量来说，还会因为所选取单位大小不同而使测量结果的数字大小不同。

在生产、科研、商品贸易及日常生活中，需要测量的物理量非常广泛，因此，确定和统一这些物理量的单位是十分重要的。由于历史的原因，世界各国和地区，甚至一个国家的不同地区都有自己采用的单位，如长度单位有公里、米、尺、丈、英里、英寸等。为了解决这一问题，国际上成立了国际计量委员会，并制定了国际计量单位。具体内容包括：

1. 国际单位制的基本单位

长度单位：米 (m)；

质量单位：千克 (kg)；

时间单位：秒 (s)；

电流单位：安 [培] (A)；

热力学温度单位：开 [尔文] (K)；

发光强度单位：坎 [德拉] (cd)；

物质的量单位：摩 [尔] (mol)。

2. 国际单位制的辅助单位

平面角单位：弧度 (rad)；

立体角单位：球面度 (sr)。

3. 国际单位制中具有专门名称的导出单位

利用基本单位，经过计算、推理、仪器测定等辅助手段，可以推出许多其他不同的物理量单位。例如：

频率：赫 [兹] (Hz)，在 1 秒时间间隔内发生一个周期过程的频率，即 $1\text{Hz} = 1\text{s}^{-1}$ ；

力 (重力)：牛 [顿] (N)，使 1 千克质量的物体产生 1 米每二次方秒加速度的力，即 $1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ ；

压力 (压强)：帕 [斯卡] (Pa)，等于 1 牛顿每平方米，即 $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ ；

能量 (功、热)：焦 [耳] (J)，1 牛顿力的作用点在力的方向上移动 1 米距离所做的功，即 $1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$ ；

电荷量：库 [仑] (C)，1 安培电流在 1 秒时间间隔内所运送的电荷量，即 $1\text{C} = 1\text{A} \cdot \text{s}$ ；

电位 (电压、电动势)：伏 [特] (V)，流过 1 安培恒定电流的导线内，当两点之间所消耗的功率为 1 瓦特时，这两点之间的电位差为 1 伏特，即 $1\text{V} = 1\text{W}/\text{A}$ ；

电容：法 [拉] (F)，当电容器充 1 库仑电荷量时，它的两极板之间出现 1 伏特的电位差，即 $1\text{F} = 1\text{C}/\text{V}$ 。

4. 国家选定的非国际单位制单位

1986 年 7 月 1 日，我国颁布的“中华人民共和国计量法”中规定，我国的法定计量单位

是国际单位制。但考虑到现实的具体情况,现在还允许使用一些非国际单位制的单位。例如:

时间单位:天,(日)(d)、[小]时(h)、分(min);

平面角单位:度($^{\circ}$)、[角]分(')、[角]秒(");

体积单位:升(L);

质量单位:吨(t)。

1.2 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,如温度、压力、速度等。尽管电工仪表应用广泛,品种规格繁多,但基本上可以分为两大类。

1. 电测量指示仪表

电测量指示仪表又称为直读仪表,常用的交直流电流表、电压表、功率表、万用表等,大多是电测量指示仪表。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度尺上的位置直接读出被测量的值。电测量指示仪表还可以作以下分类:

- 1) 按准确度等级:可分为0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0七级。
 - 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、隔爆七种类型。
 - 4) 按仪表防御外界磁场或电场影响的性能:可分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、便携式等。
 - 7) 按工作原理:可分为磁电系、电磁系、电动系、感应系、静电系和振簧系等。
- 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。

2. 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和交直流补偿式的测量仪器。在1.1节已经讨论过,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,不过机械示波器及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 电工仪表的组成和基本原理

1.3.1 电测量指示仪表的组成

电测量指示仪表的组成框图如图1-3所示。从图1-3可以看出,整个电测量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 与测量机构中的 y 和 α 能够严格保持一定的函数关系,因此可以根据角位移 α 的值,直接读出被测量 x 的值。

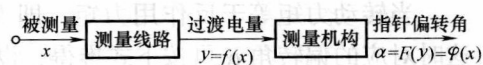


图 1-3 电测量指示仪表的组成框图

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,不论是功率表、频率表还是相位表,都是用磁电系仪表作为表芯(即测量机构),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。

1.3.2 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,它接受被测量,并转换成机械能,推动可动部分转动,以便能将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下面三个部分。

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,则是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。

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,所以其转动力矩 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_{α} 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,盘形弹簧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

$$M_{\alpha} = D\alpha \quad (1-3)$$

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。

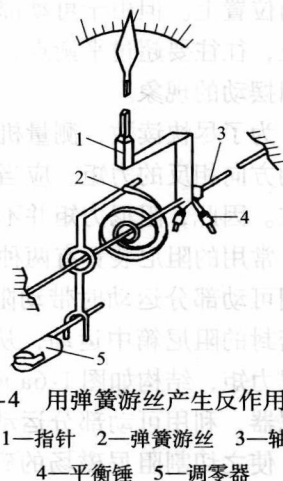


图 1-4 用弹簧游丝产生反作用力矩

1—指针 2—弹簧游丝 3—轴
4—平衡锤 5—调零器

当转动力矩等于反作用力矩，即 $M = M_\alpha$ 时，可动部分就停止偏转。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

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

$$\alpha = F(x)/D \quad (1-4)$$

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_α 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 1-5 上的 M_1 或 M_2 点，将使 $M \neq M_\alpha$ ，从而产生差力矩，这个力矩被称为定位力矩 M_b ，即

$$M_b = M - M_\alpha \quad (1-5)$$

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，因此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部分。为了减小摩擦误差，可以提高游丝反作用力矩系数 D ，以便增加定位力矩，也可以想办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的，例如比率型仪表。

3. 产生阻尼力矩 M_p 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。

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，结构如图 1-6a 所示；另一种是磁感应阻尼器，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，结构如图 1-6b 所示。

此外还有油阻尼器，这种阻尼装置结构比较

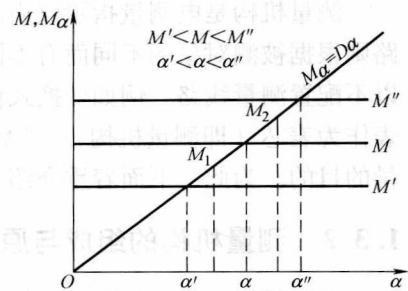


图 1-5 转动力量矩与偏转角 α 的关系

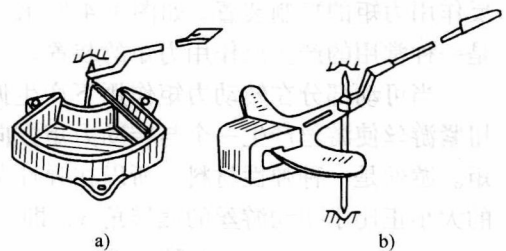


图 1-6 阻尼器的结构

a) 空气阻尼器 b) 磁感应阻尼器

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,即指针式的指针与标度尺、光标式的光路系统和标度尺,以及调零器、平衡锤、止动器和外壳等附属部分。

1.4 电工仪表的误差和准确度

1.4.1 电工仪表误差的分类

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。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。

电工仪表的误差分为下面两类。

1. 基本误差

基本误差是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等所造成的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,还包含附加误差。

1.4.2 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。

例如,用一块电压表测量电压,其读数为 201V,而标准表的读数(认为是真值)为 200V,其绝对误差由式(1-6)得出为

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

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,用一块电压表测量 200V 电压,绝对误差为 +1V,而用另一块电压表测量 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,就是绝对误差 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 有时也可以用 A_x 代替,即相对误差也

可表示为

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

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,因此,若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

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

最大引用误差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,所以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,可能与实际测量结果的相对误差有较大的差别。说它实用,是因为最大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度尺的全长上基本保持恒定,而相对误差却随着被测量的减小逐渐增大,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。最大引用误差,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的比较简便的方法。

1.4.3 仪表的准确度

由于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 GB/T 776—1976《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度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 仪表准确级和误差的规定

仪表的准确级	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 GB/T 776—1976《电测量指示仪表通用技术条件》中也做了相应规定。

1.5 电工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，这些性能主要包括下面几点。

1. 仪表灵敏度和仪表常数

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，可得到均匀的标度尺刻度，这时

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

仪表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 ，均匀标度尺的仪表常数

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

2. 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的重要技术性能之一，它表征仪表的准确程度，误差越小，准确度越大。

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。升降变差是指测量被测量 A_0 时，指针从零向上量限摆动的读数为 A'_0 ，而从向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，对指针和标度尺的结构也有不同要求。图 1-7 所示是一种附有镜面的精密仪表的标度尺，读数时应使眼睛、指针和镜中影像成一直线。

3. 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度尺全长 1% 所需要的时间。阻尼时

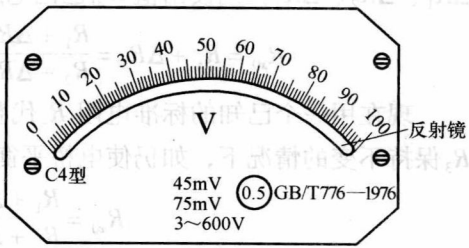


图 1-7 精密仪表的标度尺

间要尽可能短,以便迅速取得读数,一般不得超过 4s,对于标度尺长度大于 150mm 者,不得超过 6s。

4. 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小。

5. 仪表的坚固性与可靠性

仪表的坚固性与可靠性是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。

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,也不论是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,这种差异就称为测量误差。测量误差可分为系统误差、偶然误差和疏忽误差三类。

1.6.1 系统误差

测量过程保持恒定或者遵循某种规律变化(例如有规律地增大或减小)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,如果是仪表放置不当造成的误差,那么正确安装之后,误差也就消除了。但多数情况下产生系统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小这种误差。消除系统误差有以下几种方法。

1. 用比较法消除系统误差

在测量方法中提到的零值法和差值法可以消除或减小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 1-8 所示为替代法测电阻的电路。

先将被测电阻 R_x 接入电桥,可求得其值为

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

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_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

$$R_{x0} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_2 + \Delta R_2} (R_3 + \Delta R_3) = R_s + \Delta R_s \quad (1-17)$$

比较式 (1-16) 和式 (1-17) 得 $R_x = R_s$ 。

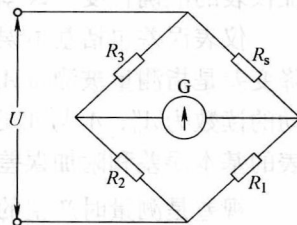


图 1-8 替代法测电阻

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 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 所示为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 $\Delta_m = 0.13\text{A}$, 则仪表准确度为

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

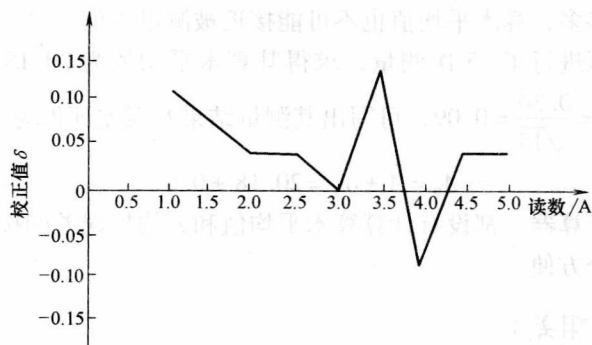


图 1-9 校正曲线

如果电流表读数为 3.5A , 该读数的校正值为 $+0.13\text{A}$, 则

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

1.6.2 偶然误差

偶然误差也称随机误差, 是一种大小、符号都不确定的误差。偶然误差是由周围环境的偶发原因引起的, 因此无法消除, 但这种误差具有以下几个特征: ① 在一定测量条件下, 偶然误差的绝对值不会超过一定界限, 即所谓有界性; ② 绝对值小的误差出现的机会多于绝对值大的误差出现的机会, 即所谓单峰性; ③ 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,即偶然误差正态分布曲线如图1-10所示。

由于偶然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

$$A_0 = \bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n}$$

(1-21)

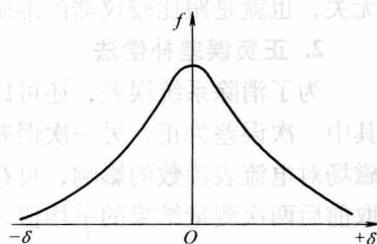


图1-10 偶然误差正态分布曲线

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,那么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,所谓标准差可通过方均根差 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,首先要消除系统误差,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,并计算得出方均根差为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

$$A_0 = \bar{A} \pm \sigma_x = 20.18 \pm 0.09$$

现在常用的电子计算器,都设有计算算术平均值和方均根误差的按键,利用它来处理偶然误差,计算起来十分方便。

1.6.3 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、仪器故障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等,都属于疏忽误差。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,因此凡是剩余误差 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。

1.7 工程上最大测量误差的估算

在工程上,因为偶然误差比较小,所以常常略去不计,只有在精密测量或精密实验中才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。