



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电工仪表 与测量

贺令辉 主编

陈 斌 王灵芝 副主编



中国电力出版社

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



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电工仪表与测量

主 编 贺令辉
副主编 陈 斌 王灵芝
编 写 黄晓梅 高 虹
主 审 杜文学 解建宝



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材。

全书共分十一章,主要包括电工仪表与测量的基本知识、测量用互感器、磁电系仪表、电磁系仪表、电动系仪表、万用表与钳形电流表、绝缘电阻表与接地电阻测量仪、直流电桥与交流电桥、电量变送器、数字式仪表与电子式仪器等内容。为便于学习,每章附有小结和习题;为培养和提高实践技能、激发潜能,相关章节还配有适当的实验与实训内容。

本书不但适合于高等专科学校和职业技术学院电力类、动力类、工业自动化类电气专业的学生使用,而且也可作为相关专业领域技能型培训学员和农村劳动力转移的电工类技能培训学员的培训教材和自学用书,还可供从事电气测量工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工仪表与测量/贺令辉主编. —北京:中国电力出版社, 2006

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 7 - 5083 - 4200 - 3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 026123 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>)

冶林印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 5 月第一版 2006 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.25 印张 275 千字

印数 0001—3000 册 定价 17.20 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材,是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的,并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审,又列为全国电力职业教育规划教材,作为职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标;符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求;具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性;符合职业教育的特点和规律,具有明显的职业教育特色;符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书,也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书在内容选择上紧扣教学目标,符合大纲要求,注意从工程实际出发,紧密联系实际,力求体现新技术、新工艺和新方法的应用,突出职业教育的特点。在编写过程中,考虑到高职院校教学的特点,力图做到理论联系实际,既注意测量仪表的原理、测量方法的原理介绍,同时又强调仪表的使用方法和测量方法的掌握,深入浅出、通俗易懂。

通过本教材的理论与实践教学,力求使学生掌握常见电工仪表的基本结构、工作原理、性能特点,具备利用各种仪表进行有关电气量测量的能力及处理各种仪表常见故障的能力,培养学生理论联系实际、严谨求实、团结协作的精神,激发学生的潜能,提高学生独立分析、解决问题的能力。

本书由长沙电力职业技术学院的贺令辉老师担任主编,并编写第一章以及承担统稿工作;由江西电力高级技工学校的陈斌老师担任副主编,并编写第六、十、十一章;由保定电力职业技术学院的王灵芝老师担任副主编,并编写第五、九章;由长沙电力职业技术学院的黄晓梅老师编写第三、四章;由长沙电力职业技术学院的高虹老师编写第二、七、八章。本书由西安电力高等专科学校的杜文学老师、解建宝老师担任主审。

在编写本书的过程中,我们查阅和参考了较多的文献资料及教材,受益匪浅,在此向这些文献资料及教材的作者一并致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,恳请读者提出宝贵意见。

编者

目 录

前言

第一章 电工仪表与测量的基本知识	1
第一节 电工测量的基本知识	1
第二节 电工仪表的分类及表面标志	4
第三节 电工仪表的组成及其作用	7
第四节 电工仪表的误差及准确度等级	9
第五节 电工仪表的主要技术要求	14
第六节 电测量指示仪表的正确选择与使用方法	16
第七节 测量误差及其消除办法	17
第八节 有效数字及测量结果的表示	20
本章小结	23
思考题与习题	24
第二章 测量用互感器	26
第一节 概述	26
第二节 电压互感器	26
第三节 电流互感器	29
第四节 互感器的选择与使用方法	32
本章小结	33
思考题与习题	34
第三章 磁电系仪表	35
第一节 磁电系测量机构	35
第二节 磁电系电流表	37
第三节 磁电系电压表	39
第四节 磁电系检流计	41
第五节 磁电系仪表的技术性能与使用	44
本章小结	45
思考题与习题	45
第四章 电磁系仪表	47
第一节 电磁系测量机构	47
第二节 电磁系电流表	50
第三节 电磁系电压表	51
第四节 电磁系仪表的技术性能与使用	53

本章小结	55
思考题与习题	56
第五章 电动系仪表及功率的测量	58
第一节 电动系测量机构	58
第二节 电动系电流表和电压表	60
第三节 单相电动系功率表	62
第四节 三相有功功率的测量	66
第五节 三相无功功率的测量	70
第六节 电动系功率因数表	73
本章小结	76
思考题与习题	78
第六章 万用表与钳形电流表	79
第一节 万用表的结构和原理	79
第二节 万用表的使用	84
第三节 钳形电流表	87
本章小结	88
思考题与习题	89
第七章 绝缘电阻表与接地电阻测量仪	90
第一节 绝缘电阻表的结构与测量原理	90
第二节 绝缘电阻表的选择与使用	92
第三节 接地电阻测量仪的工作原理	93
第四节 接地电阻测量仪的使用	95
本章小结	96
思考题与习题	97
第八章 直流电桥与交流电桥	98
第一节 直流单臂电桥	98
第二节 直流双臂电桥	100
第三节 交流电桥	102
本章小结	108
思考题与习题	109
第九章 电测量变送器	110
第一节 概述	110
第二节 交流电流和交流电压变送器	112
第三节 功率变送器	113
第四节 功率因数变送器	118
第五节 其他电量变送器的简介	121
本章小结	122
思考题与习题	123

第十章 电子测量仪器	124
第一节 电子示波器	124
第二节 模拟式电子电压表	131
本章小结	134
思考题与习题	135
第十一章 数字式仪表	136
第一节 直流数字电压表	136
第二节 数字式万用表	141
第三节 电子计数器	145
第四节 自动测试系统与智能化仪表	152
本章小结	155
思考题与习题	155
附录 实验实训	157
参考文献	175

电工仪表与测量的基本知识

第一节 电工测量的基本知识

一、电工测量的意义

电力工业的产品是电能，由于这一产品的特殊性，人们不能用感觉器官直接感受和反映它，因此，在电能的生产、传输、分配和使用的各个环节中，只有通过各种仪表的测量才能准确反映各种电气量的大小及变化情况，从而保证电能的质量以及电力系统的经济和安全运行。如为了保证电能质量，需要电工仪表来测量和监视频率和电压的高低、变化情况；为了保证电力系统的经济和安全运行，必须随时测量和监视发电厂和用户的功率大小及平衡情况，以便调整发电机的出力或增减用户的负荷。

不论是在电气设备的安装、调试、运行和检修中，还是在对电子产品进行检验、分析及鉴定时，都会遇到电工测量方面的技术问题。如变压器大修后，要用绝缘电阻表来测量其绝缘电阻，以判断其绝缘性能的好坏；在测试电子电路时，可用万用表来测量电容器的漏电阻以判断其好坏。

可见，电工仪表与测量是从事电气工作的技术人员必须掌握的一门学科。

二、测量的基本概念

1. 测量的定义

简而言之，测量就是为确定被测量（未知量）的大小而进行的实验过程，即通过试验的方法，将被测量与已知的标准量进行比较，以确定被测量具体数值的过程。比较的结果一般由数字及单位名称两部分组成，如用电压表测得某一电压为 36V，就是通过电压表将被测电压与标准电压 1V 相比较所得的结果，即说明被测电压是标准电压 1V 的 36 倍。要准确测量某一量的大小，必须包括被测对象、单位量的复制体和测量设备等部分。如在上述测量电压的过程中，需要测量的电压即为被测对象；标准电压（1V）即为单位量的复制体，常称为度量器（简称为量具或标准），它已间接地参与测量；电压表是将被测量（被测电压）与标准量（标准电压，即 1V）进行比较的测量设备。又如用天平称物体的质量时，物体的质量即为被测对象，用来称重的砝码即为量具，它已直接地参与测量，天平则为测量设备。可见，测量的实质就是通过测量设备将被测量与标准量直接或间接进行比较的过程。

在所有测量技术中，有一种是以电磁规律为基础的测量技术即电工测量。所谓电工测量，就是将被测量的各种电量（如电压、电流、电阻、电功率、电能、频率、相位、功率因数、电容等）和各种磁量（如磁感应强度、磁通量和磁导率等）与作为测量单位的同类电工量进行比较，以确定其大小的过程。用来测量各种电工量的仪器仪表，统称为电工仪表。电工测量具有准确、灵敏、迅速、易操作等优点。还可以将电工仪表与其他装置配合在一起进行非电量（如温度、压力、机械量等）的测量。因此，电工测量应用非常广泛。

2. 测量的过程

在实际测量中，一般要经过准备、测量及数据处理三个阶段。在准备测量阶段，首先要根据测量的内容和要求正确选择测量仪器与设备，并确定测量的具体接线方案和测量步骤。

在测量阶段,要按事先设计的接线方案正确接线,并严格按照规范进行操作,正确记录测量数据,同时要注意人身安全和设备安全。测量的最后工作是进行数据处理,通过对测量数据或曲线的处理、分析,求出被测量的大小及测量误差,以便为解决工程实际问题提供可靠依据。

三、测量方法的分类

测量对象不同,测量的目的和要求可能不同,加上测量条件(如使用的仪器仪表)多种多样,因此测量的方式和方法也就有所不同。

根据测量过程的特点可将测量方法分为直读测量法、比较测量法两大类。

1. 直读测量法

直读测量法就是通过电工指示仪表直接读取测量数据的测量方法,如用直流电桥测电阻,用电流表测电流等。直读测量法的特点如下:

(1) 量具并不直接参与测量。测量过程中,量具虽然不直接参与测量,但指示仪表在刻度时仍然要借助量具,故量具通过间接的方式参与了测量。

(2) 测出的数据可能是中间(或过渡)量,也可能是最终量。如用电压表测量电压时,由电压表读出的电压值为最终量;如用伏安法测量电阻时,读出的电压值则为中间量。

(3) 测量结果的准确度受仪表误差的限制。对测量准确度要求不高时可采用直读测量法。

(4) 测量简便、迅速。

2. 比较测量法

所谓比较测量法,就是将被测量与已知的同类量具或标准通过比较仪器或设备直接进行比较,从而得到被测量数据的一种测量方法,如用电桥测量电阻所采用的方法就是比较测量法。对测量的准确度要求较高时一般采用比较测量法。所以,为了保证测量结果的准确度,必须有较准确的仪器或设备。此外,还应保持较严格的实验条件,如温度、湿度等。比较法的特点如下:

(1) 量具直接参与测量。

(2) 准确度和灵敏度较高。测量误差的大小主要由标准量具的精度及指零仪表的灵敏度决定,其误差最小可达 $\pm 0.001\%$ 。

(3) 测量设备复杂,操作麻烦。

根据被测量与标准量进行比较的具体特点,比较测量法又可分为零值法、差值法和替代法三种。

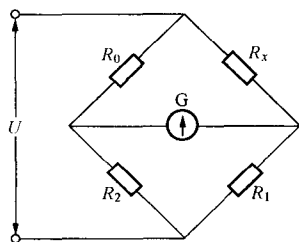


图 1-1 零值法测电阻

(1) 零值法。被测量与已知量进行比较时,通过调节一个或几个已知量,使被测量和已知量对比较仪器的作用相互抵消为零(即使指零仪指零),从而得到测量结果的测量方法称为零值法,又称为零位测量法或平衡法。用天平称物体质量的方法采用的就是零值法。测量时,调节砝码的重量使天平平衡,指针指到零位,即表明物体的质量与砝码的重量相等。又如用直流电桥测量电阻时,采用的测量方法也是零值法,其测量电路如图 1-1 所示。

(2) 差值法。差值法也叫微差法,是通过测量被测量与已知量的差值,来求得被测量大

小的一种测量方法。如已知量为 X_0 ，被测量与已知量的差值为 δ ，则被测量的大小为 $X = X_0 + \delta$ 。

如图 1-2 所示电路中，通过电位差计可以求得被测电池的电动势 E_x 。设已知标准电池的电动势为 E_0 ，通过电位差计测得 E_0 与 E_x 的差值为 δ ，则根据已知电动势 E_0 和 δ 即可求出被测电池的电动势的大小为

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

采用这种方法进行测量时，一般要求 δ 较小，仅占测量结果很小的一部分，否则，测量误差较大。因此，在实际测量中较少采用此法。

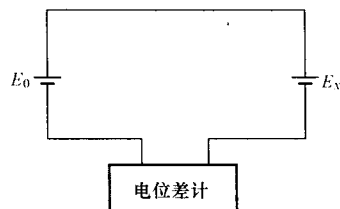


图 1-2 差值法测电动势

(3) 替代法。将被测量与已知量先后接入同一测量仪器或设备，在不改变测量仪器或设备的工作状态及外部测量条件的情况下，由已知标准量的数值来替代被测量大小的方法，称为替代法。古代曹冲称大象时用石头的重量来代替大象的重量，采用的方法就是替代法。采用替代法时，由于测量仪器或设备的工作状态及外部条件没有改变，所以对前后两次测量结果的影响是相同的，故测量结果的准确度与仪器本身无关，仅决定于标准量本身的准确度。

根据测量结果的获得方式可分为直接测量法、间接测量法和组合测量法三种。

1. 直接测量法

工程技术方面的测量一般采用直接测量方法，如用电压表直接测量电压，用电流表直接测量电流，或者用万用表直接测量电阻等都属于直接测量法。

直接测量法的主要特点是简便、快捷，不需要进行辅助计算即可从数字仪表或已标有被测量单位的指示仪表上直接得到被测量的大小；但测量的准确度受仪器仪表准确度的限制，而且还与仪表的内阻、测量电路的连接方式等因素有关。

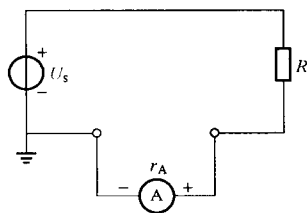


图 1-3 直接法测电流

用电流表直接测量电路电流的电路如图 1-3 所示。在该电路中，如果电流表的内阻 r_A 为零，则电流表的指示值即等于被测电路电流的实际值；实际上电流表的内阻不可能为零，因此电流表接入电路后在一定程度上会改变电路原来的工作状态，导致测量结果存在误差。因此，为了减少测量误差，要求电流表的内阻比负载电阻小得多。

2. 间接测量法

在测量中，如果测量仪器设备不够，或者被测量不能直接读出，则可以利用被测量与某一个或几个中间量的函数关系，先测出中间量的大小，然后根据已知的函数关系来求出被测量的值，这种测量方法称为间接测量法。如测量物体的运动速度时，可以先测出物体运动的距离和时间，然后根据公式 $v = \frac{S}{t}$ 求出物体运动的速度。又如为了测量导体的电阻率，可以先测出导体的长度 l 、截面积 S 和电阻 R ，然后根据公式 $\rho = \frac{l}{RS}$ 求出电阻率的大小。

间接测量法的特点是测量方法灵活、多样，但测量误差较大，而且要经过计算才能得到

被测量的数值。

3. 组合测量法

电工测量中,往往要在不同条件下多次测量某一中间量的值,然后根据待测量与中间量的函数关系联立求解方程组,最后才能得到多个未知量数值,这种测量方法称为组合测量法,一般用于精密测量和科学试验。组合测量法实际上也是一种间接测量被测量的方法。如采用组合测量法测量电阻的温度系数 α 、 β (待测量)时,可以分别测量该电阻在 20°C 、 $t_1^{\circ}\text{C}$ 及 $t_2^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值 R_{20} 、 R_{t1} 、 R_{t2} (中间量),然后根据 α 、 β 与电阻值 R_{20} 、 R_{t1} 、 R_{t2} 的函数关系

$$R_{t1} = R_{20}[1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2] \quad (1-2)$$

$$R_{t2} = R_{20}[1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2] \quad (1-3)$$

联立求解方程组,即可求出电阻温度系数 α 和 β 的值。

采用组合测量法时,虽然测量过程和计算都比较麻烦,但测量精确度较高。

第二节 电工仪表的分类及表面标志

一、电工仪表的分类

电工仪表的种类繁多,根据其在进行测量时得到被测量数值的方式不同,可以分为电测量指示仪表、比较式仪表和数字仪表三大类。

1. 电测量指示仪表

电测量指示仪表是先将被测量转换为可动部分的角位移,然后通过可动部分的指示器(如指针、光标等)在标度尺上的位移直接读出被测量的大小,如常用的交直流电压表、电流表等。指示仪表按不同的分类方法又可分为以下几种。

(1) 按用途分类,可以分为电流表(包括微安表、毫安表、安培表等)、电压表(包括伏特表和毫伏表等)、功率表、电能表、功率因数表、频率表、相位表、欧姆表、绝缘电阻表(兆欧表或摇表)及万用表等。

(2) 按被测电流的种类分类,可分为直流表、交流表及交直流两用表等。

(3) 按使用的环境条件分类,可以分为A、A1、B、B1、C五个组。其中C组环境条件最差,各组的具体使用条件在国家标准GB776—1976中都有详细的说明,如A组的使用条件是环境温度应为 $0\sim+40^{\circ}\text{C}$,在 25°C 时的相对湿度为95%。

(4) 按仪表防御外界电场或磁场的性能分类,可分为I、II、III、IV四个等级。I级仪表在外磁场或外电场的影响下,允许其指示值改变 $\pm 0.5\%$;II级仪表允许改变 $\pm 1.0\%$;III级仪表允许改变 $\pm 2.5\%$;IV级仪表允许改变 $\pm 5.0\%$ 。

(5) 按仪表外壳的防护性能分类,可分为普通、防溅、防水、防爆等类型。

(6) 按仪表的使用方式分类,可分为安装式(配电盘式)、便携式等。

(7) 按仪表的工作原理分类,可分为磁电系、电磁系、电动系、感应系、静电系、热电系、整流系、电子式等。

(8) 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等七级。数字越小,仪表的准确度等级越高。

2. 比较式仪表

用比较法进行测量时常采用比较式仪表或仪器。它包括直流比较式仪器和交流比较式仪器两类。如直流电桥、电位差计、标准电阻箱等都是直流比较式仪器，而交流电桥、标准电感和标准电容等都属于交流比较式仪器。比较式仪器测量准确度比较高，但操作过程复杂、测量速度较慢。

3. 数字式仪表

数字式仪表，是指在显示器上能用数字直接显示被测量值的仪表。它的特点是把被测量转换为数字量后，再以数字方式直接显示出测量结果。它与微处理器配合使用可实现自动选择量程、自动存储测量结果、自动进行数据处理及自动补偿等功能，因此具有速度快、准确度高、读数方便、容易实现自动测量等优点。但也有不足之处，如观察者与仪表的距离稍远就可能看不清所显示的数字，因此，实际测量中，测量人员与仪表之间的距离应合适，以保证读数的准确性。

电工仪表除分成上述三大类外，有的还分为其他几种类型，如记录式仪表（或仪器）、扩大量程装置及变换器等。记录式仪表或仪器一般用来记录被测量随时间的变化情况，如示波器、X—Y 记录仪等。而对于用来扩大量程的装置如分流器、电压互感器和电流互感器等经常作为电工仪表的附件而不单独列成一类。至于变换器，可以将非电量转换为电量或实现不同电量之间的变换，因此，电测量指示仪表通过变换器可以实现对非电量或其他电量的高准确度测量。

总之，电工仪表的种类繁多，分类方法也多种多样，在此不一一列举。

二、电工仪表的表面标志

为了便于正确选择和使用电工仪表，通常将仪表的类型、测量对象的单位、准确度等级、工作原理系列等以文字或图形符号的形式标注在仪表的表盘（面板）上，作为仪表的表面标志。常见电工测量符号及常见仪表的表面标记如表 1 - 1 和表 1 - 2 所示。

表 1 - 1 常见电工测量的名称及符号表

序号	测量量的名称	测量量的符号	单位名称	单位符号
1	电阻	R	欧 [姆]	Ω
2	电抗	X	欧 [姆]	Ω
3	阻抗	Z	欧 [姆]	Ω
4	电流	I	安 [培]	A
5	电压	U	伏 [特]	V
6	有功功率	P	瓦 [特]	W
7	无功功率	Q	乏	var
8	视在功率	S	伏 [特] 安 [培]	$V \cdot A$
9	有功电能 [量]	W	瓦 [特] [小] 时	$W \cdot h$
10	无功电能 [量]	W_Q	乏 [小] 时	$var \cdot h$
11	功率因数	$\lambda (\cos\varphi)$	—	—
12	频率	f	赫 [兹]	Hz

表 1-2 常见电工仪表的表面标记

分类	符 号	名 称	分类	符 号	名 称
电流种类	—	直流	端钮	+	正端钮
	~	交流		-	负端钮
	≍	交直流		*	公共端钮
	≡	三相交流	工作位置	⊥	标尺位置垂直
测量对象	A	电流		┐	标尺位置水平
	V	电压		∠60°	标尺位置与水平面 60°
	W	有功功率	外 界 条 件		I 级防外磁场 (例如磁电系)
	var	无功功率			I 级防外电场 (例如静电系)
	Hz	频率			II 级防外磁场及电场
工作 原 理		磁电系仪表			III 级防外磁场及电场
		电磁系仪表			IV 级防外磁场及电场
		电动系仪表			A 组仪表
		磁电系比率表			B 组仪表
		铁磁电动系仪表			C 组仪表
		整流系仪表	绝 缘 强 度		不进行绝缘强度试验
准 确 度 等 级	1.5	以表尺量限的百分数表示			绝缘强度试验为 2kV
	1.5	以指示值的百分数表示			

三、电工仪表的型号

电工仪表的型号与其表面标志一样，也可以反映仪表的原理、用途等。常见指示仪表的型号编号规则如图 1-4 所示。

1. 携带式仪表型号的编写规则及其含义

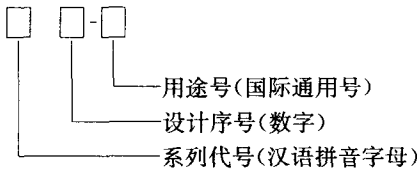


图 1-4 携带式指示仪表的型号

用途号：表示仪表用于测量什么量，如仪表的用途号为“V”，则表示该仪表用于测量电压。

系列代号：一般按仪表的工作原理编制，如 C 表示磁电系仪表，T 表示电磁系仪表。

如一块携带式电工仪表的型号为 T19-V, 则说明该表的系列号是 T, 为电磁系仪表; 设计序号为 19; 用途号为 V, 表明其用途是测量电压, 是一块电压表。

2. 安装式仪表型号的编写规则及其含义

图 4-2 为安装式指示仪表的型号。

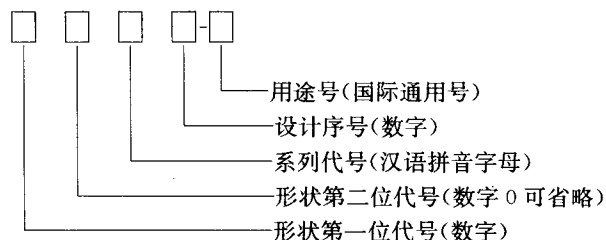


图 1-5 安装式指示仪表的型号

安装式仪表的形状第一位代号一般按仪表的面板形状最大尺寸编制, 形状第二位代号一般按仪表的外壳形状尺寸编制, 用途号、设计序号及系列代号的含义与携带式仪表的含义相同。如一块携带式电工仪表的型号为 44C7-kA, 则说明该表的形状代号为 44, 据此可从有关生产厂家的产品目录查出其尺寸和安装开孔尺寸; C 表示该表为电磁系仪表; 其设计序号为 7; 用途号为 kA, 表明该表用于测量电流, 是一块电流表。

第三节 电工仪表的组成及其作用

一、电测量指示仪表的组成

由于电测量指示仪表历史悠久、结构简单、价格便宜, 应用非常广泛, 故此处主要介绍电测量指示仪表的组成。电测量指示仪表虽然种类较多, 结构各不相同, 但其主要作用都是将被测电量(如电压、电流等)转换成仪表可动部分的角位移, 为了实现这种变换, 这类仪表的基本结构大致相同, 都是由测量线路和测量机构两部分组成。其基本结构方框图如图 1-6 所示。

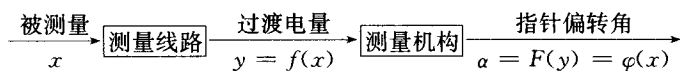


图 1-6 电测量指示仪表的基本结构

测量机构是电测量指示仪表的核心, 任何情况都不能省略, 没有测量机构就不能构成电测量指示仪表, 它的作用是将被测电量 x (或过渡电量 y) 所产生的电磁力, 转换成仪表指针的角位移 α 。

在电工测量中, 因有的被测量数值较大或因其他原因不能直接加到仪表的测量机构进行测量, 因此需要通过测量线路将被测量(如电流、电压、功率等)按一定比例关系转换成测量机构可以接受的过渡电量, 例如, 利用分流器、附加电阻等都属于测量线路。

同一系列的仪表, 通常采用相同的测量机构, 加上不同的测量线路, 就可构成测量不同电量的仪表。如变换式仪表, 就是采用电磁系仪表作为测量机构, 根据被测量对象的不同分别配上不同的测量线路(即变换器)就可实现对功率、频率、相位等多种电量的测量。

二、测量机构的组成和原理

电测量指示仪表的测量机构一般由固定和可动两个部分组成。不同类型的测量机构, 可

动部分和固定部分的具体结构各不相同，它们的区别将会在后面的章节中详细说明。根据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成驱动装置、控制装置和阻尼装置三个部分。

1. 驱动装置

当被测量作用于仪表后，就会产生一个力矩作用到仪表的测量机构，推动仪表的可动部分发生偏转，通常称这个力矩为转动力矩或者转矩，记作 M ，产生转动力矩的装置称为驱动装置。转动力矩可以由电磁力、电力或其他力产生。不同类型的仪表，产生转动力矩的原理和方式也不同。例如：电磁系仪表是利用动铁片与载流的固定线圈之间，或动铁片与被此载流线圈磁化的静铁片之间的电磁力产生转动力矩的；电动系仪表是利用载流的动圈与载流的固定线圈之间的电力产生转动力矩的；而静电系仪表，是利用固定电极板与可动电极板之间的静电场作用力产生转动力矩，而使可动部分发生偏转。不论哪种系列的仪表，其转动力矩的大小都应与被测电量及可动部分偏转角 α 之间存在一定的函数关系。

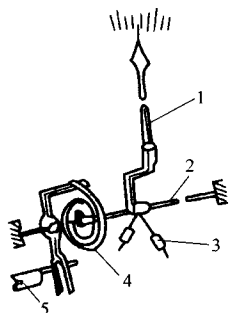


图 1-7 用游丝产生反作用力矩的装置

1—指针；2—轴；3—平衡锤；
4—游丝；5—调零器

2. 控制装置

如果指示仪表的测量机构只有转动力矩的作用，而没有反作用力矩与之平衡，则不论被测量多大，可动部分都要偏转到极限位置。就像用秤称物体的重量而不用秤砣一样，不论所称的物体有多重，秤杆总会向一端高高翘起，这样一来，就不能准确称出物体的重量。电测量指示仪表也是如此，如果没有一个方向相反的力矩作用到测量机构上，则仪表就只能反映出有无被测量，而不能准确测出被测量的数值。因此，为了使可动部分偏转角的大小与被测量大小成一定的比例关系，使仪表能准确测量出被测量的数值，就必须有一个方向总是和转动力矩相反、大小随活动部分的偏转角大小变化的力矩与转动力矩平衡，这个力矩称为反作用力矩。仪表测量机构中产生反作用力矩的装置称为控制装置。

在灵敏度较低的仪表中，反作用力矩由游丝（即螺旋弹簧）的弹力产生，如图 1-7 所示。在灵敏度较高的仪表（如测量微小电量的检流计）中，因转动力矩很小，为使单位被测量所引起的偏转角度大，其反作用力矩一般由吊丝或张丝产生。可动部分在转动力矩的作用下产生偏转时，同时使游丝（或吊丝、张丝等）扭转变形而产生反作用力矩。在弹性范围内，反作用力矩 M_f 的大小与可动部分偏转角的大小成正比关系，即

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

式中： D 为反作用力矩系数，由游丝（或吊丝、张丝等）的材料、几何形状和尺寸所决定，游丝（或吊丝、张丝等）制成固定尺寸后， D 为常数； α 为可动部分的偏转角。

可见，反作用力矩系数一定时，偏转角越大，反作用力矩越大。

当转动力矩 M 与反作用力矩 M_f 的大小相等即 $M=M_f$ 时，作用到可动部分的力矩代数和为零（不计摩擦力矩时），可动部分不再继续偏转而处于平衡位置，这时可动部分偏转角的大小为

$$\alpha = \frac{M}{D} \quad (1-5)$$

由于转动力矩与被测量成一定的比例关系,所以偏转角的大小可以反映使被测量的大小。

3. 阻尼装置

由于测量机构的可动部分具有一定的惯性,因此,当 $M=M_f$ 时,可动部分不可能立即停留在平衡位置,而是在平衡位置的左右来回摆动,这样一来,不能及时读取被测量的大小,有时甚至失去读数的最佳时间,导致判断错误。所以需要一个吸收这种振荡能量的装置,使可动部分尽快地静止,达到尽快读数的目的,这种装置就是阻尼装置,简称为阻尼器。常用的阻尼器有两种,即空气阻尼器和磁感应阻尼器(阻尼器的基本结构将在相应的测量机构中进行介绍),如图 1-8 所示。

阻尼器产生的力矩称为阻尼力矩,其方向始终与可动部分运动的方向相反,对可动部分的摆动起制动作用。在空气阻尼器中,可动部分转动带动翼片在密封的阻尼箱中运动,使翼片受到空气的阻力而产生阻尼力矩。而磁感应阻尼器中,是利用可动部分转动时带动金属阻尼片切割磁力线运动,在阻尼片中感应涡流,产生的涡流与永久磁铁的磁场相互作用产生阻尼力矩。

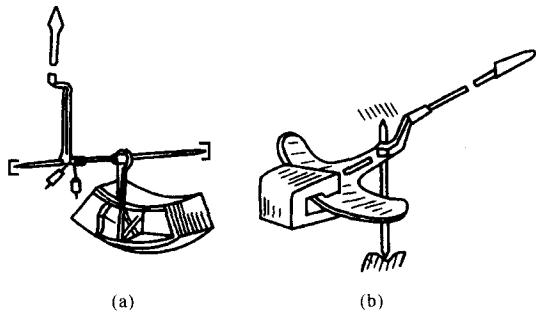


图 1-8 阻尼装置

(a) 空气阻尼器; (b) 磁感应阻尼器

值得注意的是,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,对测量结果无影响。

测量机构除以上产生力矩的三种装置外,还有指示装置、调零装置、轴和轴承及外壳等部件。

指示装置主要由指针、标尺(光标式的为光路系统和刻度尺)、限动器和平衡锤组成。其中,限动器的作用是限制指针的最大活动范围;平衡锤的作用是防止在指针偏转时,由于重心不正而带来误差。

通过调零装置可以调节游丝或张丝的固定端,从而改变初始力矩,使仪表的机械零位与零位分度线重合,以减小测量误差。

轴和轴承的主要作用是支承活动部分转动。为了减小摩擦,轴尖一般用钢材制成。而轴承材料较多,如青铜、玻璃、宝石等都是常用的轴承材料。为了减小摩擦,延长使用寿命,在一些仪表如长寿命电能表中已推广使用磁推轴承和磁悬浮轴承等。

外壳通常由铁或塑料等材料制成,用来保护仪表内部的结构。

第四节 电工仪表的误差及准确度等级

一、仪表的误差及其分类

在电工测量中,不论采用哪种仪表,仪表的指示值(测量结果)与被测量的实际值(真值)之间总会有一定的偏差,这个偏差叫做仪表的误差。不过,由于不同仪表的结构、原理和制造工艺不同,其指示值与被测量真实值的接近程度也不尽相同,通常称之为仪表的准确度,即仪表的准确度是指仪表的指示值与被测量真实值的接近程度。仪表的准确度越高,仪

表的指示值与被测量的真实值越接近,说明仪表的误差越小;反之,仪表的准确度越低,仪表的指示值越偏离被测量的真实值,说明仪表的误差越大。可见,仪表本身的准确程度可以用仪表误差的大小来表示。根据仪表误差产生的原因,电测量指示仪表的误差一般分为基本误差和附加误差两大类。

1. 基本误差

基本误差,是指仪表在规定的正常工作条件下进行测量时所具有的误差。所谓规定的正常工作条件,是指在规定的温度、湿度、放置方式、没有外电场和磁场干扰等条件下,对于交流仪表还应包括波形(正弦波)、频率(50Hz或制造厂规定的其他值)等。这种误差是由于仪表本身结构和工艺等方面不够完善等原因而产生的,如由于仪表活动部分存在摩擦、零件装配不当、轴倾斜、标尺刻度划分不准等所引起的误差都属于基本误差。这种误差是仪表本身所固有的,是不可能完全消除的。

2. 附加误差

附加误差,是指仪表不在规定的正常工作条件使用时,由于某些因素的变化使仪表产生的除基本误差以外的一些误差。如环境温度过高、波形不是正弦波、外界电磁场的影响等都会产生附加误差。可见,附加误差实际上是一种因外界条件改变而产生的一种额外误差,因此,仪表偏离规定的正常工作条件使用时,形成的总误差中,除了基本误差之外,还包含有附加误差。

二、仪表误差的表示方法

电测量指示仪表的误差可用绝对误差 Δ 、相对误差 γ 和引用误差 γ_n 三种形式表示。

1. 绝对误差 Δ

仪表的指示值 A_x 与被测量的实际值 A_0 之间的差值,称为绝对误差,一般用 Δ 表示,即

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

在实际测量中,被测量的实际值很难求得,一般用准确度等级高的标准表所测得的数值或通过理论计算得出的数值来近似代替。

【例 1-1】 已知某单相交流电路中的电源电压为 220V,用甲、乙两只电压表进行测量时的读数分别为 218.5V 和 220.5V。试求两只电压表的绝对误差。

解: 由式(1-6)可得

$$\text{甲表测量的绝对误差为 } \Delta = A_x - A_0 = 218.5 - 220 = -1.5 \text{ (V)}$$

$$\text{乙表测量的绝对误差为 } \Delta = A_x - A_0 = 220.5 - 220 = 0.5 \text{ (V)}$$

由以上计算可以看出:

(1) 绝对误差 Δ 是有大小、正负和单位的量。绝对误差的单位与被测量的单位相同,其大小和符号则表示了测量值偏离被测量真实值的程度和方向。绝对误差为正值即正误差,说明仪表的指示值大于被测量的实际值;绝对误差为负值即负误差时,说明仪表的指示值小于被测量的实际值。

(2) 测量同一个量时,绝对误差 Δ 的绝对值越小,说明测量结果越准确。甲表的指示值偏离实际值 1.5V,而乙表的指示值偏离实际值只有 0.5V,显然用乙表测量时的测量结果更准确。