



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）



普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）

DIANGONG YIBIAO YU CELIANG

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
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）、普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）。

全书共分十二个模块，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、电能表、电工型万用表与钳形电流表、绝缘电阻表与接地电阻测量仪、电桥、电测量变送器、电子测量仪器与仪表、数字式仪表等内容。为便于学习，每个模块附有小结和习题；为培养和提高实践技能，激发潜能，相关模块还配有适当的实验与实训内容。本书在内容选择上注重从工程实际出发，紧密联系生产实际，内容丰富且深入浅出、通俗易懂。

本书不仅适合于高职高专院校电力技术类、自动化类等相关专业在校学生使用，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. —2版. —北京：中国电力出版社，2011.6

普通高等教育“十二五”规划教材 高职高专教育. 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 高职高专教育

ISBN 978-7-5123-1779-6

I. ①电… II. ①贺… III. ①电工仪表—高等职业教育—教材②电气测量—高等职业教育—教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 105518 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 5 月第一版

2011 年 6 月第二版 2011 年 6 月北京第十二次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.5 印张 376 千字

定价 26.80 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

本书第一版为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，于2006年5月出版。五年来，受到同行们的普遍关注和好评，2008年本书被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育），因此修订出版第二版。

本书依据五年多的使用实践与广大读者的宝贵建议和意见，在维持第一版教材体系及内容基本不变的基础上，进行了局部修改和完善，更新了部分概念和内容，并增加了电能表及电能计量的内容，使之更适应各高校师生的教学需要。

本书由长沙电力职业技术学院的贺令辉担任主编，除负责修改模块一的内容外，还新编写了模块六、模块十二中的课题四及相关的实验实训项目部分；江西电力职业技术学院的陈斌担任副主编，并负责修改模块七、十一、十二（课题四除外）及相关的实验实训项目部分；保定电力职业技术学院的王灵芝担任副主编，并负责修改模块五、十及相关的实验实训项目部分；长沙电力职业技术学院的黄晓梅负责修改模块三、四及相关的实验实训项目部分；长沙电力职业技术学院的高虹负责修改模块二、八、九及相关的实验实训项目部分。

本书由西安电力高等专科学校的杜文学、解建宝担任主审。再版过程中得到许多同行和工程技术人员的关心和支持，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2011年6月

第二版前言

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，考虑到高职学院教学的特点，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编写第三、四章；由长沙电力职业技术学院的高虹编写第二、七、八章。本书由西安电力高等专科学校的杜文学、解建宝担任主审。

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

2006年5月

目 录

前言

第一版前言

模块一 电工仪表与测量的基本知识	1
课题一 电工测量的基本知识	1
课题二 电工仪表的分类及表面标志	4
课题三 电工仪表的组成及其作用	7
课题四 电工仪表的误差及准确度等级	10
课题五 电工仪表的主要技术要求	15
课题六 电测量指示仪表的正确选择与使用方法	17
课题七 测量误差及其消除办法	19
课题八 有效数字及测量结果的表示	21
小结	24
思考与练习	26
模块二 测量用互感器	28
课题一 概述	28
课题二 电压互感器	28
课题三 电流互感器	32
课题四 互感器的选择与使用方法	36
小结	38
思考与练习	38
模块三 磁电系仪表	40
课题一 磁电系测量机构	40
课题二 磁电系电流表	42
课题三 磁电系电压表	46
课题四 磁电系仪表的技术性能与使用	50
小结	51
思考与练习	52
模块四 电磁系仪表	54
课题一 电磁系测量机构	54
课题二 电磁系电流表	57
课题三 电磁系电压表	59
课题四 电磁系仪表的技术性能与使用	61
小结	63
思考与练习	64

模块五 电动系仪表	65
课题一 电动系测量机构	65
课题二 电动系电流表和电压表	68
课题三 单相电动系功率表	70
课题四 三相有功功率的测量	75
课题五 三相无功功率的测量	79
课题六 电动系功率因数表	83
小结	87
思考与练习	88
模块六 电能表	91
课题一 电能表的分类及铭牌标志	91
课题二 感应式电能表的结构与原理	93
课题三 电能表的正确接线	102
课题四 电子式电能表	108
课题五 电能表的技术性能与使用	111
小结	115
思考与练习	116
模块七 电工型万用表与钳形电流表	118
课题一 电工型万用表的结构和原理	118
课题二 电工型万用表的使用与维护	124
课题三 钳形电流表	127
小结	128
思考与练习	129
模块八 绝缘电阻表与接地电阻测量仪	130
课题一 绝缘电阻表的结构与测量原理	130
课题二 绝缘电阻表的选择与使用	132
课题三 接地电阻测量仪的工作原理	134
课题四 接地电阻测量仪的使用	136
小结	137
思考与练习	138
模块九 电桥	139
课题一 直流单臂电桥	139
课题二 直流双臂电桥	142
课题三 交流电桥	145
小结	151
思考与练习	152
模块十 电测量变送器	153
课题一 概述	153
课题二 交流电流和交流电压变送器	155

课题三 功率变送器	157
课题四 功率因数变送器	162
课题五 其他电量变送器的简介	166
小结	167
思考与练习	168
模块十一 电子测量仪器与仪表	169
课题一 示波器概述	169
课题二 SR8 型双踪示波器	171
课题三 模拟式电子电压表	178
小结	181
思考与练习	182
模块十二 数字式仪表	183
课题一 直流数字电压表	183
课题二 数字式万用表概述	188
课题三 DT830 数字式万用表	190
课题四 数字式双钳相位伏安表	193
课题五 电子计数器	197
课题六 自动测试系统与智能化仪表	204
小结	207
思考与练习	208
附录 实验实训	209
实验实训 1 磁电系电流表和电压表量程的扩大	209
实验实训 2 工频电压、电流的测量	211
实验实训 3 普通单相功率表的使用	213
实验实训 4 两表法测量三相有功功率	215
实验实训 5 三表跨相法测量三相无功功率	217
实验实训 6 单相电能表的初步检定	219
实验实训 7 电工型万用表的使用	221
实验实训 8 用绝缘电阻表测量电动机的绝缘电阻	224
实验实训 9 接地电阻的测量	226
实验实训 10 用直流单臂电桥测量电动机绕组的直流电阻	228
实验实训 11 用直流双臂电桥测量导线的电阻	229
实验实训 12 示波器的使用	231
实验实训 13 数字式万用表的使用	234
实验实训 14 电子计数器的使用	236
参考文献	239

模块一 电工仪表与测量的基本知识

课题一 电工测量的基本知识



教学目标

- (1) 了解电工测量的意义。
- (2) 了解电工测量的基本概念。
- (3) 了解测量的主要过程。
- (4) 掌握电工测量方法的类型与特点。



教学内容

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，才能保证电能的质量，才能保证电力系统的经济和安全运行。为了保证电能质量，需要用电工仪表来测量、监视频率和电压的大小、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、监视发电厂和用户的功率大小及平衡情况，以便调整发电机的输出功率，使其满足负荷的需要。

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、分析及检定时，都会遇到电工测量方面的技术问题。例如：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重要的知识和技能之一。

二、测量的基本概念

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 24V（伏），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 24 倍。要准确测量某一量的大小，必须有被测对象、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），其间接地参与测量；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（其直接地参与测量），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、电感、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,这一过程也称为电气测量。用来测量各种电工量的仪器仪表,统称为电工仪表。电工测量不仅具有准确、灵敏、迅速、易操作等优点,而且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。

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,如用电流表测电流。直读测量法的特点有如下几点。

(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) 测量方法简便,测量过程迅速。

2. 比较测量法

所谓比较测量法,就是将测量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。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。比较测量法的特点有以下几点。

(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。

(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(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,调节砝码的质量使天平平衡,指针指到零位,即表明物体的质量与砝码的质量相等。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。差值法也称为微差法,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。

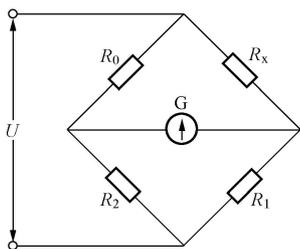


图 1-1 零值法测量电阻电路

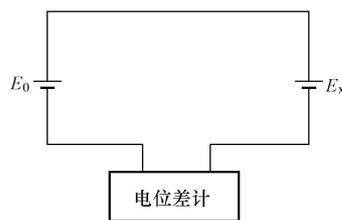


图 1-2 差值法测量电动势

(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，仅取决于标准量本身的准确度。

根据测量结果的获得方式不同，测量方法又可分为直接测量法、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，或者用万用表的欧姆挡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；但是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。

用电流表直接测量电流的电路如图 1-3 所示。在该电路中，如果电流表 PA 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，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。

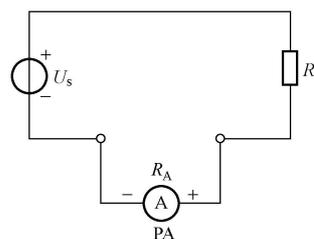


图 1-3 直接测量法测量电流的电路

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 $\rho = \frac{RS}{l}$ 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_{t_1} 、 R_{t_2} (中间量), 然后根据 α 、 β 与电阻值 R_{20} 、 R_{t_1} 、 R_{t_2} 的函数关系

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

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

联立求解方程组, 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, 但测量精度较高。

课题二 电工仪表的分类及表面标志



教学目标

- (1) 能说出电工仪表的类型。
- (2) 认识常用电工仪表的表面标志。
- (3) 能通过仪表的表面标志识别各种电工仪表。
- (4) 知道各种电工仪表的型号与规格。



教学内容

一、电工仪表的分类

电工仪表的种类繁多。根据测量时得到被测量数值方式的不同, 电工仪表可以分为电测量指示仪表、比较式仪表和数字式仪表三大类。

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偏转角, 然后通过可动部分的指示器 (如指针、光标等) 在标度尺上的位置直接读出被测量的大小, 如常用的交直流电压表、电流表等。电测量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 (俗称兆欧表或摇表) 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 GB 776—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~+40℃,在 25℃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±0.5%;II 级仪表允许改变±1.0%;III 级仪表允许改变±2.5%;IV 级仪表允许改变±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(C)、电磁系(T)、电动系(D)、感应系(G)、静电系(Q)、整流系(L)、电子式(S)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 七级。数字越小,仪表的准确度等级越高。仪表的准确度等级一般用数字或数字加圆圈的形式表示,如①表示仪表的准确度等级为 1.0 级。

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表和交流比较式仪表两类。例如,直流电桥、电位差计、标准电阻箱等都是直流比较式仪表,而交流电桥、标准电感和标准电容等都属于交流比较式仪表。比较式仪表测量准确度比较高,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。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,如记录式仪器仪表、扩大量程装置及变换器等。记录式仪器仪表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精度测量。

总之,电工仪表的种类繁多,分类方法也多种多样,而且,近年来智能仪表不断涌现,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。常见电工测量的名称及符号和常见电工仪表的表面标志见表 1-1、表 1-2。

表 1-1 常见电工测量的名称及符号

序号	被测量的名称	被测量的符号	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志

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	
A	电流			标尺位置水平		
V	电压			标尺位置与水平面 60°		
测量对象	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		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
		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下。

1. 可携式仪表的型号

可携式仪表的型号及其含义如图 1-4 所示。

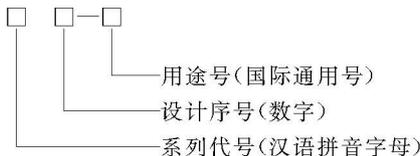


图 1-4 可携式指示仪表型号

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。

如一块可携式电工仪表的型号为 T19 - V 的说明：该表的系列代号是 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. 安装式仪表的型号

安装式仪表的型号及其含义如图 1-5 所示。

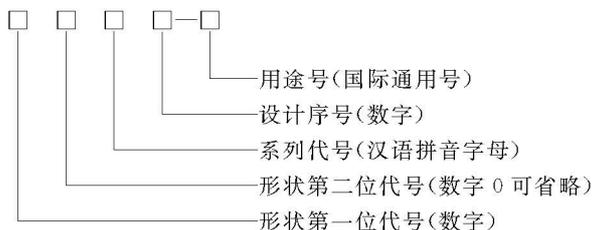


图 1-5 安装式仪表型号

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 的说明：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 表示该表为磁电系仪表；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。

电工仪表的型号一般标明在仪表的表盘上。电能表的型号与以上有不同之处，将在后面介绍。

课题三 电工仪表的组成及其作用



教学目标

- (1) 了解电工仪表的主要组成部分及其作用。
- (2) 了解仪表测量机构的组成及各部分的作用。
- (3) 能简要说明常用电工仪表测量机构的工作原理。



教 学 内 容

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,但它们主要作用都是将被测电量(如电压、电流等)变换成仪表可动部分的角位移。为了实现这种变换,该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。

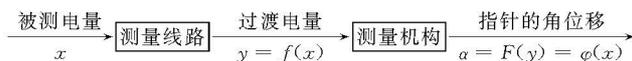


图 1-6 电测量指示仪表的基本结构

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)按一定比例关系变换成测量机构可以接受的过渡电量,例如,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,就是采用磁电系仪表作为测量机构,根据被测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部分和可动部分组成。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模块中详细说明。测量机构主要包括以下几个部分。

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、电动力或其他力产生。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,或动铁片与此载流线圈磁化的静铁片之间的电磁力产生转动力矩;电动系仪表是利用载流的可动线圈与载流的固定线圈之间的电动力产生转动力矩;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,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角位移 α 之间存在一定的函数关系。

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' 的大小与可动部分偏转角的大小成正比关系,即

$$M' = D\alpha \quad (1-4)$$

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 表示可动部分的偏转角。

由式(1-4)知,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' 的大小相等即 $M=M'$ 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 $M=M'$ 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,难以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。所以需要有一个吸收这种振荡能量的装置,使可动部分尽快静止,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,如图1-8所示。

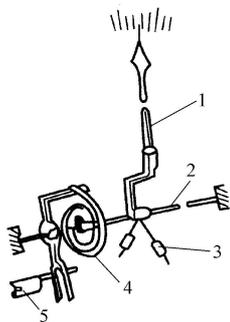


图 1-7 用游丝产生反作用力矩的装置

1—指针; 2—轴; 3—平衡锤;
4—游丝; 5—调零器

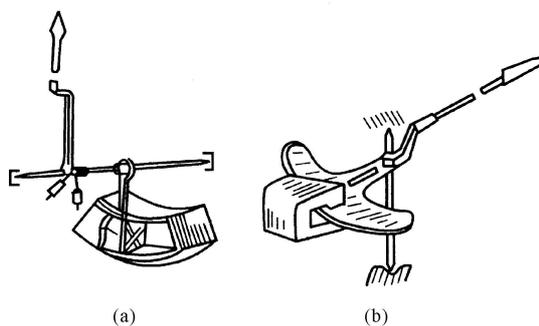


图 1-8 阻尼器

(a) 空气阻尼器; (b) 磁感应阻尼器

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。而在磁感应阻尼器中,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。

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。

课题四 电工仪表的误差及准确度等级



教学目标

- (1) 熟悉仪表误差的类型及产生原因。
- (2) 了解仪表误差的表示方法。
- (3) 能简单计算仪表的误差。
- (4) 熟悉仪表准确度等级的概念。
- (5) 能说明仪表准确度等级与误差的关系。
- (6) 能根据测量要求选择合适准确度等级的仪表。



教学内容

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,这个偏差称为仪表的误差。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,是指规定的温度、湿度、放置方式、没有外电场和磁场干扰等条件,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、工艺或其他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 Λ_x 与被测量的实际值 Λ_0 之间的差值,称为绝对误差,一般用 Δ 表示,即

$$\Delta = \Lambda_x - \Lambda_0 \quad (1-6)$$

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

$$\text{甲表测量的绝对误差为 } \Delta = \Lambda_x - \Lambda_0 = 218.5 - 220 = -1.5(\text{V})$$

$$\text{乙表测量的绝对误差为 } \Delta = \Lambda_x - \Lambda_0 = 220.5 - 220 = 0.5(\text{V})$$

由[例 1-1]的计算可以看出:

(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,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。

2. 相对误差 γ

绝对误差虽然能在一定程度上反映仪表的准确程度,但有其不足之处,在测量不同量时,有时很难判断测量结果的准确程度。例如,第一次用一只电流表测量 5A 电流时,绝对误差 $\Delta_1=0.5\text{A}$,第二次用另一只电流表测量 200A 电流时,绝对误差 $\Delta_2=5\text{A}$ 。显然,后者的绝对误差 Δ_2 大于前者的绝对误差 Δ_1 ,但后者的误差只占被测量的 2.5%,而前者的误差却占被测量的 10%。这说明前者的误差对测量结果的影响大于后者,换句话说,第二次测量时测量结果的准确度高于一测量时测量结果的准确度。可见,用绝对误差占被测量的

比例来表示误差的大小,更能说明测量结果的准确程度,所以在工程上常采用相对误差来表示测量结果的准确程度。

所谓相对误差,就是绝对误差 Δ 与被测量的真实值 A_0 的比值,一般用百分数表示,即

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

在要求不太高的工程测量中,相对误差常用绝对误差与仪表指示值之比的百分数来表示,即

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

【例 1-2】 已知用甲电压表测量 100V 电压时,指示值为 102V;用乙电压表测量 10mV 电压时,指示值 10.5mV。试比较两表测量的相对误差。

解 (1) 由式 (1-5) 可求出两表测量的绝对误差:

$$\text{甲表测量的绝对误差为 } \Delta_1 = A_{x1} - A_{01} = 102 - 100 = 2(\text{V})$$

$$\text{乙表测量的绝对误差为 } \Delta_2 = A_{x2} - A_0 = 10.5 - 10 = 0.5(\text{mV})$$

则 $\Delta_1 > \Delta_2$

(2) 由式 (1-7) 可求出两表测量的相对误差:

$$\text{甲表测量的相对误差 } \gamma_1 = \frac{\Delta_1}{A_{01}} \times 100\% = \frac{2}{100} \times 100\% = 2\%$$

$$\text{乙表测量的相对误差 } \gamma_2 = \frac{\Delta_2}{A_{02}} \times 100\% = \frac{0.5}{10} \times 100\% = 5\%$$

则 $\gamma_1 < \gamma_2$

由 [例 1-2] 计算结果可知,虽然甲表的绝对误差比乙表的大,但其相对误差却比乙表的小,故甲表测量的准确度比乙表的高。显然,在测量不同大小的被测量时,不能简单地用绝对误差来判断测量结果的准确程度。实际测量中,相对误差不仅用来表示测量结果的准确程度,而且便于在测量不同大小的被测量时,对其测量结果的准确程度进行比较。

3. 引用误差 γ_n

用同一只仪表测量不同的被测量 A_0 时,其绝对误差 Δ 的变化不大,但由式 (1-8) 可看出,随被测量 A_x 的不同,相对误差变化较大,即仪表在全量限范围内各点的相对误差是不相同的,所以相对误差虽然可以表示测量结果的准确程度,但不能全面表征仪表本身的准确度。为此工程上采用引用误差来表征仪表的准确程度(根据 GB/T 6592—2010 电工和电子测量设备性能表示的规定,应改为用基准误差表征;但本书考虑到使用者的习惯,仍采用引用误差的表述形式)。

引用误差,是指仪表某一刻度点读数的绝对误差 Δ 与规定的基准值 A_m (仪表的最大量限,这一规定值常称为引用值,故对应的误差称为引用误差)比值的百分数,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不尽相同,所以一般用可能出现的最大绝对误差 Δ_m 与仪表的最大量限 A_m 的百分比来表示仪表的引用误差,也称为最大引用误差,即

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

一般仪表的误差及其特点见表 1-3。

表 1-3 仪表的误差及其特点

误差 大小及特点	绝对误差	相对误差	引用误差
大小	$\Delta = A_x - A_0$	$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\%$ $\gamma = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\%$	$\gamma_n = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\%$ $\gamma_{nm} = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\%$
特点	有大小、正负、单位之分	只有大小、正负之分	只有大小、正负之分
	大小和正负符号表示测量值偏离被测量真实值的程度和方向； 能在一定程度上反映仪表的准确程度	能说明测量结果的准确程度，不能说明仪表本身的准确程度	能说明仪表本身的准确程度

三、电测量指示仪表的准确度

电测量指示仪表的准确度是指仪表或附件在保证允许误差和改变量在规定限值内的计量要求的级别，是表征其指示值与真实值接近程度的量。仪表在测量大小不同的被测量时，其绝对误差或多或少会有所变化，故根据式（1-9）计算的引用误差也会发生变化，用这种引用误差来表示仪表的准确度就缺乏其唯一性，因此，工程上规定用最大引用误差来表示电测量指示仪表的准确度。仪表的准确度一般用仪表的准确度等级表示。设仪表的准确度等级为 K ，则有

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

或

$$K \geq \frac{|\Delta_m|}{A_m} \times 100 \quad (1-12)$$

可见，仪表的准确度等级 K 反映了仪表在规定的正常工作条件下使用时，允许的最大引用误差的范围，即仪表的准确度等级为 K 时，其基本误差的最大允许范围为 $\pm K\%$ （不超过 $\pm K\%$ ）。仪表的准确度等级越高，最大引用误差越小，也就是基本误差越小。例如，一只量程为 150mA 的电流表，其最大绝对误差为 $\Delta_m = 0.75\text{mA}$ ，则该电流表的最大引用误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% = \frac{0.75}{150} \times 100\% = 0.5\%$$

故仪表的准确度等级为

$$K \geq \frac{|\Delta_m|}{A_m} \times 100 = \frac{0.75}{150} \times 100 = 0.5$$

根据有关规定，我国生产的电工仪表的准确度等级一般分为七个等级（也有分为更多级的，如有功率表和无功率表的准确度等级可分为十级），它们在规定的正常工作条件下使用时，其基本误差不应超过相应的值，具体规定见表 1-4。

表 1-4 电工仪表的准确度等级与基本误差

准确度等级 K	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

仪表的准确度等级通常标注在仪表的盘面上。不同准确度等级的仪表一般用于不同的测量场合。例如：准确度等级为 0.1、0.2 级的仪表一般作为标准表使用，用来鉴定准确度较低的仪表；0.5、1.0、1.5 级仪表主要用于实验室；准确度更低的仪表主要用于现场测量或用作安装式仪表。

【例 1-3】 已知某电流表量程为 100A ，且该表在全量程范围内的最大绝对误差为 $\pm 0.85\text{A}$ ，则该表的准确度等级为多少？

解 由式 (1-10) 可得仪表的最大引用误差为

$$\gamma_{\text{nm}} = \frac{\Delta_{\text{m}}}{\Lambda_{\text{m}}} \times 100\% = \frac{0.85}{100} \times 100\% = 0.85\%$$

或
$$K \geq \frac{|\Delta_{\text{m}}|}{\Lambda_{\text{m}}} \times 100 = \frac{0.85}{100} \times 100 = 0.85$$

该表的最大引用误差为 0.85%，大于 0.5%，小于 1.0%，说明其准确度等级为 1.0 级。

同理，由仪表的准确度等级可以算出测量结果可能出现的最大绝对误差、最大相对误差。例如，某仪表的准确度等级为 K ，由式 (1-11) 可知，仪表在规定工作条件下测量时，测量结果中可能出现的最大绝对误差为

$$|\Delta_{\text{m}}| \leq K\% \times \Lambda_{\text{m}} \quad (1-13)$$

最大相对误差为

$$|\gamma| = \frac{|\Delta_{\text{m}}|}{\Lambda_0} \times 100\% \leq K\% \times \frac{\Lambda_{\text{m}}}{\Lambda_0} \approx K\% \times \frac{\Lambda_{\text{m}}}{\Lambda_{\text{x}}} \quad (1-14)$$

【例 1-4】 现有一只 500mA 、0.5 级的毫安表和一只 100mA 、1.5 级的毫安表，如果要测量 50mA 的电流，问选择哪一只毫安表测量时的准确度高些？

解 用 500mA 、0.5 级的毫安表测量时，可能出现的最大绝对误差与相对误差分别为

$$\Delta_{\text{m1}} = \pm K_1\% \times \Lambda_{\text{m1}} = \pm 0.5\% \times 500 = \pm 2.5(\text{mA})$$

$$\gamma_1 = \frac{\Delta_{\text{m1}}}{\Lambda_{01}} \times 100\% = \frac{\pm 2.5}{50} \times 100\% = \pm 5\%$$

用 100mA 、1.5 级的毫安表测量时，可能出现的最大绝对误差与相对误差分别为

$$\Delta_{\text{m2}} = \pm K_2\% \times \Lambda_{\text{m2}} = \pm 1.5\% \times 100 = \pm 1.5(\text{mA})$$

$$\gamma_2 = \frac{\Delta_{\text{m2}}}{\Lambda_{02}} \times 100\% = \frac{\pm 1.5}{50} \times 100\% = \pm 3\%$$

显然，用第二只毫安表测量时，相对误差小，测量结果的准确度高。

从上述例子可以看出以下几点。

(1) 仪表的准确度并不等同于测量结果的准确度。

(2) 测量结果的最大绝对误差与所选择的仪表的准确度等级 K 及量程 Λ_{m} 有关。当仪表的准确度等级一定时，仪表的量程越大，绝对误差越大。

(3) 最大相对误差除与仪表的准确度等级 K 有关外，还与仪表的量程 Λ_{m} 和被测量的大小 Λ_0 (或 Λ_{x}) 的比值有关， $\frac{\Lambda_{\text{m}}}{\Lambda_0}$ (或 $\frac{\Lambda_{\text{m}}}{\Lambda_{\text{x}}}$) 的比值越大，误差越大。

因此，在选择仪表时，不仅要考虑仪表的准确度等级，同时还应根据被测量的大小合理选择仪表的量程，尽可能使仪表的指示值在标尺刻度的 $\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}$ 处。

课题五 电工仪表的主要技术要求



教学目标

- (1) 熟悉电工仪表的主要技术指标。
- (2) 了解电工仪表的主要技术指标对仪表性能及测量结果的影响。



教学内容

电工仪表是监测电气设备运行情况的主要工具，为了保证测量结果的准确性和可靠性，选用仪表时，主要有以下几方面的技术要求。

一、有足够的准确度

准确度等级是仪表最主要的技术特性之一。仪表在规定的工作条件下使用时，要求基本误差不超过仪表盘面所标注的准确度等级；当仪表不在规定使用条件下工作时，各影响量（如温度、湿度、外磁场等）变化所产生的附加误差，应符合国家标准中的有关规定。在选择仪表时，仪表既要有足够的准确度，但也不能太高。因为，如果仪表的准确度等级太高，会增加制造成本，同时对仪表使用条件的要求也相应提高；如果仪表的准确度太低，则测量误差太大，不能满足测量的要求。

二、有合适的灵敏度

在指示类仪表中，灵敏度是指仪表可动部分（指针或光标）偏转角的变化量 $\Delta\alpha$ 与被测量的变化量 Δx 之比，即

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x} \quad (1-15)$$

如果仪表的刻度均匀，则 $S = \frac{\alpha}{x}$ ，即仪表灵敏度的大小等于每单位被测量所引起的指针偏转角（格数）。如将 $1\mu\text{A}$ 的电流通入某微安表时，指针偏转 2 小格，则该表的灵敏度为 $S = 2\text{div}/\mu\text{A}$ （格/ μA ）。

仪表灵敏度的倒数称为仪表常数，一般用 C 表示，即

$$C = \frac{1}{S} \quad (1-16)$$

灵敏度也是电工仪表的重要技术特性之一，其大小取决于仪表的结构和线路。仪表的灵敏度越高，说明通入每单位被测量所引起的偏转角越大，指针达到满刻度位置时所需要的电流越小，也就是满偏电流越小，即仪表的量限越小。所以选择仪表时应综合考虑仪表的灵敏度和量限。

三、仪表的功耗要小

当仪表接入被测电路时，总要消耗一定的能量，仪表的功率消耗将带来两方面问题。一方面，对于仪表本身而言，由于电功率的消耗将造成测量机构和测量元件的温升，产生附加误差；另一方面，消耗了被测对象的功率会影响被测电路的原有工作状态，特别是在小功率电路中进行测量时，仪表消耗的功率越大，产生的测量误差越大。因此，仪表的功率损耗应

尽可能小。

四、有良好的读数装置

所谓良好的读数装置,是指仪表标度尺的刻度应尽量均匀,以便于读数。如果刻度不均匀,则仪表的灵敏度不是常数,刻度线较密的部分灵敏度较低,读数误差较大;而刻度线较稀的部分,灵敏度较高,读数误差较小。对刻度线不均匀的仪表,应在标度尺上标明其工作部分,如用符号“·”表示读数的起点。一般规定,工作部分的长度不应小于标度尺全长的85%。

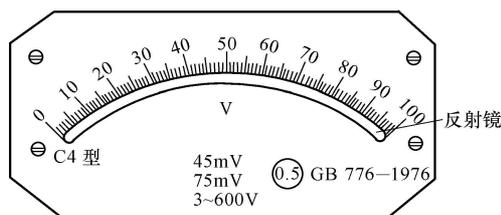


图 1-9 带有镜面的标尺

视差是测量时产生的读数误差。为了减少视差,不同准确度等级的仪表,对指针和标尺的结构也有不同要求,如0.1、0.2、0.5级等精密仪表,应具有消除视差的读数装置,即采用光指示器或反射镜式的读数装置等。如图1-9所示是一种带有镜面的标尺。对装有反射镜式读数装置的仪表,其指针应为刀形或丝形,读数时应使眼睛、指针和镜中影像成一直线。

五、有良好的阻尼装置

每种指示仪表都装有阻尼装置,阻尼装置性能的好坏通常用阻尼时间表示。所谓阻尼时间,是指仪表从接入被测电路开始,到指示器(指针或光标)在平衡位置的摆动幅度不大于标尺全长的1%时止的这段时间。不同类型的仪表,其阻尼时间也有所不同,但总的原则是阻尼时间应尽量短,以便迅速读数。质量较好的仪表阻尼时间一般不超过1.5s,普通仪表的阻尼时间也不应超过4s,对于静电系等仪表的阻尼时间不应超过6s。

六、升降变差要小

在测量过程中,由于仪表的游丝(或张丝)受力变形后不能立即恢复原始状态,更主要的是由于仪表轴尖与轴承间的摩擦力所产生的摩擦力矩会阻碍活动部分的运动,因此即使在外界条件不变的情况下,当被测量由零向上限方向平稳增加和由上限向零方向平稳减少时,同一仪表在两次测量中的指示值也会不同,这两个指示值之间的差值称为仪表的升降变差。一般要求升降变差不应超过仪表基本误差的绝对值。例如:用某电压表测量 $A_0 = 100\text{V}$ 的电压时,指针从零向上限摆动时的读数为 $A'_0 = 99.8\text{V}$,而从上限向零方向摆动的读数为 $A''_0 = 100.2\text{V}$ (在检定仪表时可通过调节电源电压的大小来实现),则该电压表的升降变差为 $\Delta = A'_0 - A''_0 = 99.8 - 100.2 = -0.4(\text{V})$ 。

七、有一定的过载能力

仪表的过载情况通常有两种:一种是仪表承受缓慢增大的负载以致超过额定值,并保持一定时间,这种过载称为延时过载,如果仪表过载能力差,经过延时过载可能导致内部元件温升过高而损坏;另一种是仪表突然过载且过载现象迅速消失,这种过载称为短时过载,短时过载可能使仪表可动部分因受机械冲击而损坏。在测量中,仪表出现过载情况是难免的,因此要求各种仪表具备一定的过载能力,以延长仪表的使用寿命。

八、有足够的绝缘强度

为了保证设备和测试人员的安全,仪表必须有足够的绝缘强度,即仪表的线路与外壳间应能承受一定的耐压值。例如,仪表和附件的所有线路与外壳的绝缘应能承受频率为50Hz

的正弦交流电压且历时 1min 的交流耐压试验。

此外, 仪表还应结构简单、牢固可靠, 受外界的影响(温度、电磁场)要小, 使用方便、造价低廉等。

关于数字式仪表的主要技术要求将在后面的模块进行讨论。

课题六 电测量指示仪表的正确选择与使用方法



教学目标

- (1) 熟悉电测量指示仪表选择的依据与方法。
- (2) 了解仪表正确使用的基本要求。
- (3) 能根据测量要求正确选择仪表的类型、准确度等级。



教学内容

一、电测量指示仪表的正确选择

在测量中, 为了顺利完成测量任务, 使测量结果满足测量要求, 首先必须正确合理地选择仪器仪表。选择仪器与仪表的主要依据如下: ①测量的目的; ②测量的原理及有关技术要求; ③测量电路。

以上内容确定后, 就可以根据以下基本原则来选择相应的仪器仪表。

1. 根据被测量的性质选择仪表

在测量中, 根据所使用的电源性质不同, 一般将电工仪表分为直流、交流和交直流两用三种。根据被测量的性质不同, 被测量分为直流量与交流量两种。直流仪表只能直接测量直流量, 交流仪表只能直接测交流量, 而交直流两用仪表既可以测量直流量, 又可以测量交流量, 所以测量时应充分考虑被测量的性质及仪表的适用范围。测量交流量时, 还应考虑电源的波形及频率, 其波形是正弦波还是非正弦波, 频率是低频、音频还是高频等。所选择的仪表应能满足其波形和频率要求。例如, 测量工频电压可选用电动系或电磁系交流电压表, 而测量音频电压则应选用电子电压表等。

2. 根据被测量的名称和单位选择仪表

在测量不同名称的电工量时, 应分别选用不同类型的电工仪表。例如, 测量电压时选用电压表, 测量电流时选用电流表。在测量同一名称的电工量时, 还应根据被测量的不同单位正确选用合适的仪表, 如测量微安级的电流时应选用微安表, 测量毫安级的电流时尽量选用毫安表。

3. 根据估算的量程选择仪表

在对被测量进行测量前, 应根据有关条件如给定的实验电路、历史数据等估算出被测量的大小, 并依此选择量程相近或稍大的仪表。如果无法估算出被测量的大小, 为了不损坏仪表, 可采用以下办法。

(1) 首先选用量程较大的仪表, 然后根据实际测量情况换成适当的量程或改用合适的仪表。

(2) 降低试验电压进行预测, 估计出在试验电压下所需的量程后再选用合适仪表按原定试验电压正式测试。

4. 根据仪表的内阻及测量对象的阻抗大小选择仪表

任何仪表本身都有内阻, 仪表接入电路后相当于接入了一个负载, 除了消耗一定的能量外, 还会改变电路中电流、电压的数值, 影响电路的工作状态, 因此会给测量结果带来相应的误差。为保证测量结果的可靠性, 减小测量误差, 选择仪表时应根据被测对象阻抗的大小来选择仪表的内阻。因为, 电压表、功率表的电压线圈等是并联接入电路的, 仪表内阻 R_V 越大, 分的电流越小, 对被测电路的电流影响越小, 所以希望其内阻越大越好。而用电流表测量电流时, 因其与被测电路是串联的, 电流表的内阻 R_A 越小, 分的电压越小, 对被测电路的电压影响越小, 故希望其内阻越小越好。在一般工程测量中, 如果测量结果的准确度要求不太高, 则对于电压表及功率表的电压线圈, 一般按 $R_V \geq 100R$ (R 代表被测电路的电阻) 来选择其内阻, 而电流表的内阻一般按 $R_A \leq \frac{R}{100}$ 来选择。

5. 根据对测量结果准确度的要求选择仪表

仪表的准确度越高, 测量的结果就越可靠, 但仪表的价格就越贵, 而且有些准确度高的仪表操作过程也比较复杂, 往往会因为操作不当而增加附加误差。此外, 测量结果的准确度不仅与仪表的准确度等级有关, 而且还与仪表的量程等因素有关。因此, 在选择仪表时, 一定要根据工程实际需要, 综合考虑仪表的量程与准确度两方面的因素。一般情况下, 选择 0.5 级及以下的仪表作为安装式仪表, 以监视被测对象; 实验室用或作为精密测量用仪表, 一般选择 0.5 级及 0.1~0.2 级的仪表即可满足测量要求。

与仪表配合使用的附加装置, 如分流器、附加电阻、电流互感器、电压互感器等, 其准确度等级一般应比仪表本身的准确度高 2~3 级, 才能保证测量结果的准确度。

6. 根据仪表的使用环境及工作条件选择仪表

选择仪表还应考虑使用环境及工作条件的要求, 如环境温度的高低、通风条件、外界电磁场的影响程度等都要综合考虑。实验室使用的仪表, 一般选择便携式仪表; 固定在盘面上的仪表, 一般选择安装式 (即配电盘式) 仪表。若对温度、湿度、外界电磁场等性能有特殊要求时, 要选择适应在此类环境中使用的仪表。

二、仪表的正确使用

选择了合适的仪表之后, 如何正确使用仪表则是保证测量结果准确甚至保证仪表与人身安全的重要条件。一只仪表的量程和准确度等选择得再合适, 如果不能正确使用, 也达不到理想的测试结果, 轻则影响测量结果的准确性, 重则损坏仪表。因此, 使用仪表时, 应注意以下几点。

(1) 首先应满足仪表工作条件的要求。如放置位置、环境温度与湿度、有无外磁场影响、机械零位或电气零位是否已调好等。

(2) 应根据被测量的性质及所给的条件, 将仪表正确接入被测电路。

(3) 进行正式测量时, 要事先估算被测量的大小, 以选择适当的仪表量程; 不能进行估算时应将仪表先放在最大量程上, 然后根据实际情况逐渐予以调整。

(4) 测量中, 要正确读取被测量的大小, 即测量数据中不应包含视差的影响。

各种仪表的具体使用方法将在后面的模块中详细介绍。

课题七 测量误差及其消除办法



教学目标

- (1) 了解测量误差的类型及特点。
- (2) 了解测量误差产生的原因。
- (3) 能根据具体测量情况采取减小测量误差的有效措施。



教学内容

前面已经提到,由于仪表不够完善等原因会给测量结果带来误差即测量误差。事实上,在实际测量中,除了仪表本身的原因外,由于测量方法不够完善、测量人员本人经验不足或者外界环境的影响等原因,都会使测量结果与被测量的真实值之间存在差异,这种差异就是测量误差。根据产生误差的原因不同,一般将其分为系统误差、偶然误差及疏失误差三大类。

一、系统误差

在相同条件下多次测量同一量时,其大小和符号都保持不变,或按一定规律变化的误差,称为系统误差。

1. 产生系统误差的原因

产生系统误差的原因主要有以下几方面。

(1) 测量仪器设备的误差。测量仪器设备的误差包括两个方面,即仪器与仪表本身不完善造成的基本误差(固有误差),以及由于仪表工作条件改变而引起的附加误差。

(2) 测量方法的误差。测量方法的误差是指由于所用的测量方法不完善、选择的仪器与仪表或者数据处理不当等引起的误差,如采用了近似公式、未考虑仪表内阻对测量结果的影响等。图 1-10 所示为用伏安法测量电阻的原理电路。由于电流表与被测电阻串联,所以电流表所测的电流 $I = I_x$, 电压表的读数 $U = U_A + U_x$ (其中, U_A 为电流表内阻 R_A 的电压降,大小为 $U_A = I_x R_A$)。根据电压表与电流表读数计算出来的电阻大小为

$$R'_x = \frac{U}{I} = \frac{U_A + U_x}{I} = R_A + R_x > R_x$$

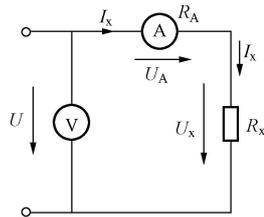


图 1-10 伏安法测量电阻

可见,由于电流表内阻的影响,使测量出来的电阻值与被测电阻的实际值之间有误差即测量误差,而且电流表的内阻越大,测量误差越大。

(3) 操作人员素质造成的误差。操作人员素质造成的误差是指由于操作人员的工作经验、分辨能力、个人特有的操作习惯等引起的测量误差,如有的操作人员读数时习惯偏大等。或者,指测试过程中,由于对测量设备操作使用不当而造成的测量误差,如仪表接地不良、测试引线太长,或者未按操作规程进行预热、调节、校准后再测量等,都会产生误差。

2. 减小系统误差的方法

减小系统误差常用的方法有如下几方面。

(1) 必须选择适当的、准确度等级较高的仪表, 并尽量满足仪表要求的工作条件。

(2) 采用正负误差补偿法。测量时, 适当调整仪器仪表的位置, 并在调整仪器仪表位置前后分别测量一次被测量, 然后取两次读数的平均值作为测量结果, 从一定程度上可减小系统误差。例如, 为了消除外磁场对电流表读数的影响, 在测得一次读数之后, 将电流表位置旋转 180° 后重新测量一次, 然后取两次读数的平均值作为测量结果。因为, 在这两次测量中, 外磁场引起的系统误差符号相反, 即一次为正误差, 则另一次为负误差, 取平均值后能减少甚至完全消除这种由外磁场影响而引起的系统误差。

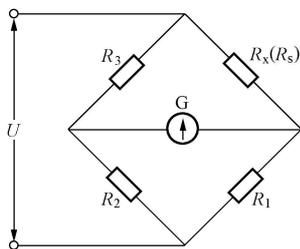


图 1-11 替代法测量电阻

(3) 采用替代法。根据替代法的原理可知, 采用替代法测量被测量能减少或消除系统误差。图 1-11 所示电路是用替代法测量电阻的原理电路。电桥平衡时, 被测电阻的值为

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \times R_3$$

如果电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 的误差分别为 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 , 则读数为

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

如果用一个已知标准电阻 R_s 代替 R_x 接入电桥, 保持 R_1 、 R_2 、 R_3 的数值不变, 并仍使电桥平衡, 则有

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

比较以上两式可知, 在保持仪表工作状态不变的情况下, 电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 的误差 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 对 R_x 、 R_s 读数的影响是相等的, 若用 R_s 的值来代替 R_x 的值, 即 $R_x = R_s$, 则可消除 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 对测量结果的影响, 也就是说, 由于仪表本身不完善引起的系统误差被消除。

(4) 引入校正值法。校正值又称修正值, 一般用 δ_r 表示, 它是被测量的真实值 A_0 与仪表的指示值 A_x 之差, 即

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

显然, 校正值与绝对误差大小相等、符号相反, 即

$$\delta_r = -\Delta$$

如果在测量前, 已经知道仪表的校正值, 则可以根据仪表的指示值与校正值求出被测量的真实值 A_0 , 即 $A_0 = A_x + \delta_r$, 从而消除系统误差。

此外, 测量前应认真检查仪表的安装及调整情况, 选择合理的接线方式, 以防止测量仪表之间的互相干扰; 测量时, 选好观测位置, 正确读数, 以消除视差带来的测量误差; 通过提高操作人员的责任心和操作技能、选用更合适的测量方法等, 可以减小由于操作人员素质造成的误差。

二、偶然误差

1. 产生偶然误差的原因

在相同条件下, 多次测量同一被测量时, 误差的大小和符号都不固定, 且无一定的规律

可循,这种误差称为偶然误差,也叫随机误差。它是由外界环境一些不确定的、偶然变化的因素引起的,如环境温度的突变、电磁场的干扰、电源电压及频率的突变,甚至测量者感觉器官无规律的微小变化等,都可能使重复测量同一量时,结果不完全相同,即产生了偶然误差。

2. 减小偶然误差的方法

一次测量结果的偶然误差没有规律可循,但多次测量中的偶然误差仍然具有一定的规律。

如果用 f 表示误差出现的次数,用 δ 表示误差的大小,则 δ 与 f 的关系曲线符合正态分布,如图 1-12 所示。

可见,偶然误差具有以下特征。

(1) 有界性,即在一定的测量条件下,偶然误差的绝对值总是小于某一有限值。

(2) 单峰性,即在多次测量中,绝对误差小的误差出现的概率大,绝对误差大的误差出现的概率小。

(3) 对称性,即随着测量次数的增多,绝对值相等、符号相反的偶然误差出现的机会均等。

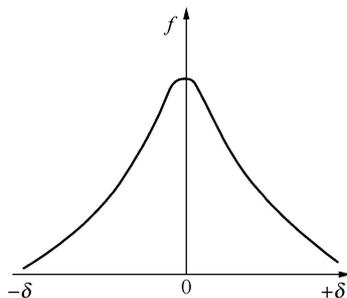


图 1-12 偶然误差的分布曲线

由于偶然误差具有上述特征,因此,在工程测量中通常采用增加重复测量次数,并取算术平均值的方法来消除偶然误差对测量结果的影响。测量次数越多,误差越小,测量结果越准确。

三、疏失误差

1. 产生疏失误差的原因

疏失误差有时也称为粗大误差,简称为粗差,是一种严重偏离测量结果的误差。产生疏失误差的原因主要有以下几点。

(1) 测量方法不当。例如,用普通万用表的电压挡直接测量高内阻电源的开路电压,用万用表测量小电阻等。

(2) 操作错误。如未按规定规定的方法及步骤进行操作,或者读错读数、记错单位、计算错误等。

(3) 测量条件的突然变化。例如,电源电压突然增高或降低、机械冲击等原因引起测量仪器的指示值发生剧烈变化等。这类变化虽然带有一定的随机性,但由于它使测量值出现明显的偏差,因此一般将其列入粗差范围。

2. 减小疏失误差的方法

一般称包含疏忽误差的测量结果为坏值,是不可信的,应及时剔除,并重新测量,直到测量结果完全符合要求为止。为了保证测量质量和速度,测试人员应加强业务知识的学习,努力提高技术水平,养成细心和耐心的良好习惯,只有这样,才能从根本上杜绝疏失误差的产生。

课题八 有效数字及测量结果的表示



教学目标

- (1) 了解有效数字的基本概念。

- (2) 了解有效数字的处理方法。
- (3) 会对有效数字进行加、减、乘、除运算。
- (4) 能用有效数字表示测量数据。



教 学 内 容

为了从测量得到的原始数据中求出被测量的最佳估计值,并计算其精度,以便为工程分析、判断和决策提供可靠依据,就必须对实验数据进行处理。被测量的结果可以用数字、图表或计算公式三种形式表示,这里主要讨论用数字形式表示的处理方法。

对测量数据进行处理时,会遇到一系列的实际问题,如测量数据取多少位最合适,当几个被测量的数据位数相差较大时应怎样计算。诸如这些问题的处理,实际上是如何正确选用有效数字的问题。

一、有效数字的处理

1. 有效数字的概念

在测量中,不论采用什么仪表,也不论采用什么测量方法,严格地说测量数据都是有误差的。这是因为,一般情况下测量数据的最后一位数字是靠估计得来的,例如,用一个0~5A量程的指针式电流表测电流时,读得电流值为4.36A,其中4.3是根据刻度线读出的,而最后一位数字“6”就是根据指针在两刻度线之间的位置估计出来的,所以有误差的测量数据及其计算出的结果也都是近似数据。为了正确合理地反映测量结果,必须确定有效数字的位数。所谓有效数字,就是指从数据左边第一个非零数字开始,直至右边欠准数字的一位为止,其间的所有数字(包括数字“0”)均为有效数字。组成数据有效数字的个数称为有效数字的位数。如电压的测量值4.65V有三位有效数字;又如某电流的测量值0.032 1mA,数字“3、2、1”三个数字是有效数字,左边两个“0”是非有效数字,所以电流值0.032 1mA也只有三位有效数字;而测量数据0.020 30MHz中,虽然“2”前面的两个“0”不是有效数字,但“2”与“3”之间的“0”及末尾的“0”都是有效数字,所以数据0.020 30MHz有四位有效数字。在上述三个数据中,最后一位有效数字“5”、“1”和“0”一般是估测出来的,故称为欠准数字或不可靠数字。记录有效数字时应注意以下几点。

(1) 有效数字只允许末尾一位是估计而得的欠准数字,因此记录测量数值时,只取一位欠准数字。

(2) 有效数字的位数与小数点的位置无关,如1.32与13.2均为三位有效数字。

(3) “0”在数字之间或末尾时均为有效数字。在测量中,如果仪表指针刚好停留在分度线上,读取记录时应在小数点后的末尾加一位零。例如,指针停在215V的分度线上,则应记为215.0V,因为数据中5是准确数字,而不是估计的欠准数字。

(4) 被测量的数值较大或较小时,要用数字乘以10的多少次幂来表示,10的多少次幂前面的数字为有效数字。例如, 8.2×10^5 、 4.20×10^{-4} 等,前一个数据有两位有效数字(8、2),后一个数据有三位有效数字(4、2、0)。在采用10的幂指数表示时,应根据误差大小来确定与10的幂指数相乘的数的位数。

【例1-5】 一被测电阻的电阻值 $R=10\ 000\ \Omega$,已知其相对误差 $\gamma=\pm 0.5\%$,其有效数字应如何表示?

解 (1) 由 $\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\%$, 可求得该电阻的绝对误差为

$$\Delta R = \gamma \times R_0 = \pm 0.5\% \times 10\,000 = \pm 50(\Omega)$$

(2) 确定表示该电阻的有效数字。按有效数字的含义, 如果将该电阻用五位有效数字表示, 即直接表示为 $R = 10\,000\Omega$, 则最末一位即个位为欠准数字, 其误差为 $\pm \frac{1}{2} \times 1\Omega = \pm 0.5\Omega$; 如果用两位有效数字乘以 10 的幂指数的形式表示, 则可表示为 $R = 10 \times 10^3\Omega$ (或表示为 $10\text{k}\Omega$), 表明其最末一位即千位是欠准数字, 其误差为 $\pm \frac{1}{2} \times 1\text{k}\Omega = \pm 0.5\text{k}\Omega$ 。可见, 采用上述两种形式表示时, 其误差范围与计算结果 $\pm 50\Omega$ 都不相符, 因此两种写法都不对。

由其绝对误差值 $\pm 50\Omega$ 可以看出, R 的有效数字末尾一位应是百位, 即为三位有效数字, 正确写法为 $10.0 \times 10^3\Omega$ 或 $10.0\text{k}\Omega$, 此时欠准数字为 $0.05\text{k}\Omega$ (即 $\pm 50\Omega$), 才与其误差相符。

2. 有效数字的处理

由以上分析可知, 有效数字的位数不仅表达了被测量的大小, 同时还表明了测量结果的精确程度, 因此, 测量结果中必须保证合适的有效数字位数。如果测量数据中有效数字位数过少, 可能不能保证测量准确度; 如果过多, 一则毫无意义, 二则会给计算带来麻烦, 所以应该剔除, 剔除测量数据中多余数字的过程即为有效数字的处理。

对测量结果有效数字进行处理时, 首先根据测量的准确度来确定有效数字的位数 (允许保留一位欠准数字), 有效数字的位数确定后, 其余数字再作舍入处理。具体方法是: 以保留数字的末位为单位, 其后面的最高位大于 5 就入, 小于 5 就舍; 恰好等于 5 时, 可按以下两种情况来处理。

(1) “5” 后面只要有非零数字就进 1。

(2) 如果 “5” 后面没有数字或全为数字零时可采用偶数法则, 即 5 前的末位为奇数时加 1, 为偶数时不变, 此规则可归纳为 “奇变偶不变”。

以上舍入规则可简单地概括为 “5 以上入、5 以下舍; 5 前奇入、5 前偶舍”。

采用上述舍入规则后, 舍入误差不会超过保留数据末位一个单位的一半, 称之为 0.5 误差原则。

【例 1-6】 18.685 1.375 0.499 2.151

对上列数据进行舍入处理, 使其只保留两位小数。

解 根据有效数字处理的原则, 可得

$$\begin{array}{ll} 18.685 \rightarrow 18.68 & 1.375 \rightarrow 1.38 \\ 0.499 \rightarrow 0.50 & 2.151 \rightarrow 2.15 \end{array}$$

值得注意的是, 本教材中所介绍的有效数字的处理方法与检定仪表中根据仪表的准确度等级对测试数据化整的方法是有区别的, 在进行数据处理时, 应具体情况具体考虑。

3. 有效数字的运算规则

(1) 如 π 、 e 、 $\sqrt{2}$ 等常数参加运算时, 有效数字的位数可不受限制, 需要几位就取几位, 其余的尾数按舍入规则处理即可。

(2) 加减运算时, 首先应对原始数据中小数点后位数多的数据进行舍入处理, 使之比小数点后位数最少的只多一位小数, 然后进行加减运算; 计算结果保留的小数点后的位数应与

原始数据中小数点后位数最少的那个数相同。例如,将 57.56、19.4、6.2150、0.876 四个数据相加时,因 19.4 小数位数最小,只有一位小数,所以应将 57.56、6.2150、0.876 三个数据进行舍入处理,使其小数点后保留两位小数,因 57.56 本身就是带有两位小数的数,故保持原数不变,而 6.2150、0.876 则变为 6.22、0.88。其计算式为 $57.56 + 19.4 + 6.22 + 0.88 = 84.06$,结果取为 84.1。

(3) 乘除运算时,首先应按上述方法对原始数据中有效数字位数多的数据进行舍入处理,使之比有效数字位数最少的那个数据只多一位有效数字;计算结果的位数与原数据中有效数字位数最少的相同。如 1.6、12.8、1.475 三个数相乘时,因 1.6 有效数字位数最少,只有两位,所以应对 12.8、1.475 两个数进行舍入处理,使其保留三位有效数字,故其计算式为 $1.6 \times 12.8 \times 1.48 = 9.8304$,其结果可取为 9.8。

二、测量结果的表示

测量结果常用的数字表示方法有测量值加不确定度法、有效数字法、有效数字和安全数字法三种。

1. 测量值加不确定度法

测量值加不确定度法是一种最常见的表示方法,特别适合于表示最后的测量结果,其优点是明确地给出了误差范围,不足之处是作为中间运算结果时,运算比较麻烦。例如,测量某电压的结果为 $75.045 \pm 0.029\text{V}$,说明其测量值为 75.045V,不确定度为 $\pm 0.029\text{V}$,也就是说该电压的数据范围是 $(75.045 + 0.029) \sim (75.045 - 0.029)\text{V}$ 。

2. 有效数字法

有效数字法实际上是由测量值加不准确度法演变而来的,采用这种表示方法时,计算测量值时更加方便,更适合表示中间结果。同样在没有特殊说明的情况下,一般有效数字的最末一位是欠准数字。例如, $75.045 \pm 0.029\text{V}$,因误差 0.029V 大于 0.01V 而小于 0.1V,所以原数据用三位有效数字表示,即可以表示为 75.0V。显然,这种表示方法具有一定的误差,一般来说会使误差范围扩大。

3. 有效数字和安全数字法

测量结果采用有效数字法表示时,会因为舍入误差而影响运算和测量结果的准确度。为了尽量减小这种误差,可在有效数字后面多取 1~2 位作为安全数字。例如: $75.045 \pm 0.029\text{V}$,用有效数字法表示时应为 75.0V,如果多取一位安全数字,即多保留一位有效数字,则应表示为 75.04V,若多取两位安全数字,则应表示为 75.045V。

采用这种表示方法时,改写后的数据更接近原来的数据,一般适用于表示中间结果或重要数据。



小 结

一、本模块主要教学内容

本模块作为全书的开篇,主要介绍了如下内容:电工测量的基本知识、电工仪表的分类及表面标志、电工仪表的组成及其作用、电工仪表的误差及准确度等级、电工仪表的主要技术要求、电测量指示仪表的正确选择与使用方法、测量误差及其消除办法、测量数据的处理。

二、本模块学习要点

1. 常用的测量方法

常用的测量方法主要有直读测量法和比较测量法两大类。比较测量法又可分为零值法、差值法和替代法三种。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。

2. 电工仪表的类型

根据测量时得到被测量数值的方式不同, 电工仪表可分为电测量指示仪表、比较式仪表和数字仪表三大类。

3. 电测量指示仪表的组成

电测量指示仪表主要由测量线路和测量机构两部分组成。其中, 测量机构一般由固定部分和可动部分组成。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、阻尼装置、支撑装置和读数装置等。

4. 仪表的误差

根据误差产生的原因, 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。误差大小可以用绝对误差 Δ 、相对误差 γ 和引用误差 γ_n 三种形式表示。

绝对误差: 是指仪表的指示值 A_x 与被测量的真实值 A_0 之间的差值。

相对误差: 是指绝对误差 Δ 与被测量的真实值 A_0 的比值, 一般用百分数表示。

引用误差: 是指绝对误差 Δ 与规定的基准值比值的百分数, 用 γ_n 表示。

5. 仪表的准确度

电测量指示仪表的准确度是指仪表在规定的正常工作条件下工作时, 在整个刻度范围内出现的最大绝对误差 Δ_m 与仪表测量上限 A_m (仪表的量程) 比值的百分数, 一般用最大引用误差表示。

6. 电工仪表的主要技术要求

为了保证测量结果的准确性和可靠性, 电测量指示仪表必须满足以下八个方面的技术要求, 即有足够的准确度、有合适的灵敏度、有较小的功耗、有良好的读数装置、有良好的阻尼装置、有较小的升降变差、有一定的过载能力和足够的绝缘强度。

7. 仪表的正确选择

选用仪表时, 既要考虑仪表的准确度等级, 也要考虑仪表的量限。选择仪表的量限时, 应使被测量的值超过量限的一半以上, 被测量越接近量限, 测量结果的相对误差越小。

8. 测量误差

根据产生误差的原因不同, 测量误差分为系统误差、偶然误差及疏失误差三大类。

系统误差: 是指在相同条件下多次测量同一量时, 大小和符号都保持不变, 或按一定规律变化的误差。

偶然误差: 也称为随机误差, 是指在相同条件下多次测量同一被测量时, 大小和符号都不固定, 且无一定的规律可循的误差。

疏失误差: 也称为粗大误差, 简称为粗差, 是一种严重偏离测量结果的误差。

9. 有效数字

有效数字, 是指从数据左边第一个非零数字开始, 直至右边欠准数字的一位为止, 其间的所有数字 (包括数字“0”)。一般采用“5 以上入、5 以下舍; 5 前奇入、5 前偶舍”的舍

人规则进行处理。

10. 测量结果的表示

采用数字形式时, 测量结果可用测量值加不确定度法、有效数字法、有效数字和安全数字法三种形式表示。



思考与练习

1-1 什么叫电工测量? 电工测量的对象主要有哪些?

1-2 常用的电工测量方法有哪几种? 用电压表和电流表法(伏安法)测量电阻属于哪种测量方法?

1-3 试说明零值法、差值法及替代法的含义和区别。

1-4 电测量指示仪表由哪几部分组成? 各部分的作用是什么?

1-5 电测量指示仪表的测量机构由哪些主要装置组成?

1-6 电测量指示仪表的测量机构在工作时应产生哪几个力矩? 这些力矩有什么特点?

1-7 电测量指示仪表按工作原理分类主要有哪几种?

1-8 常用电工仪表中有哪些标志符号? 各标志符号表示什么含义?

1-9 仪表误差分哪几类? 产生的原因各是什么? 是否都能消除?

1-10 什么是绝对误差、相对误差、引用误差和仪表的准确度?

1-11 电测量指示仪表的主要技术要求有哪些?

1-12 什么是测量误差? 分为哪几类? 试简述其产生的主要原因和消除的基本方法。

1-13 已知用甲表测 100V 电压时, 绝对误差为 +1V, 用乙表测 10V 电压时, 绝对误差为 +0.5V, 试比较两只表测量结果的准确程度。

1-14 若被测电压实际值为 12V, 现有 150V、0.5 级和 15V、2.5 级两种电压表各一只, 试问两只表可能出现的最大绝对误差和最大相对误差分别为多大? 应选择哪一只电压表?

1-15 测量 220V 的电压, 要求相对误差不超过 $\pm 1.0\%$, 如果选用量程为 300V 的电压表, 其准确度等级至少应为多少才能满足测量要求? 若选用量程为 500V 的电压表, 其准确度等级至少应为多少?

1-16 用 1.5 级、量程为 250V 的电压表, 分别测量 220V 和 110V 的电压, 计算其最大绝对误差和最大相对误差各为多少?

1-17 有一只电压表, 量程为 10V, 原来准确度为 0.5 级, 现对其进行检定, 试验数据见表 1-5, 试判断该表现在的准确度等级(未考虑升降变差的影响)。

表 1-5

习题 1-17 试验数据表

被检表读数 (V)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
标准表读数 (V)	0	0.96	1.95	3.08	3.95	5.16	5.95	7.08	8.15	9.01	10.05

1-18 被测电流的实际值是 3A, 现有一只 0.5 级、10A 和一只 1.5 级、5A 的电流表, 可能出现的最大相对误差分别为多大? 应选择哪一只电流表?

1 - 19 用量程为 10A 的电流表，测量实际值是 9A 的电流，若电流的读数为 9.2A ，试求绝对误差和相对误差？若求得的绝对误差被视为最大绝对误差，试确定该表的准确度等级？

1 - 20 有五个电阻串联，其阻值分别为 0.7512 、 4.25 、 13.75 、 28.4 、 56.625Ω ，其中最后一位为不确定数，试计算等效电阻值（以有效数字表示）。