



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

电气测量

程隆贵 谢红灿 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

电气测量

程隆贵 谢红灿 编
张若愚 周厚全 主审



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。

全书共分六章,内容包括电气测量的基本知识、电量的测量、万用表的原理与使用、电路参数的测量和传感器。本书每章后都配有习题。全书共编入了22个教学实验供读者选用。

本书可作为职业院校、成人大专等电气类专业的教材,也可作为电业职工和广大农村电气工人的培训教材,同时也是从事技术考核和技能鉴定的科技人员和技术工人的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电气测量/程隆贵,谢红灿编. —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 7-5083-4611-4

I. 电... II. ①程... ②谢... III. 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089481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>)

利森达印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006年8月第一版 2006年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 15.5印张 325千字

印数 0001—3000册 定价 19.80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。

“电气测量”是一门以电气测量基本知识和基本电气测量技术为主体、讲授和实验并重的课程。本书是本着广泛取材、突出基础、加强实践和便于使用的原则编写的。全书共六章,包括电气测量的基本知识,电量的测量、万用表的原理与使用、电路参数的测量、传感器和电气实验。

本书的主要特点:①对测量仪器仪表的结构原理叙述简明,突出实践和应用内容;②强调理论与实验并重,通过实验加强对电气测量技能的培养;③通过仿真实验的学习,培养学生计算机应用于电气测量的能力;④学习传感器,使学生明白“感受”和“思维”在现代电气测量技术中占同等地位;⑤通过综合实验的操作,使学生的分析处理实际问题的综合能力得以全面提高。

本书对不同层次的工程技术人员有着较为普遍的参考价值,可通过对各章基本内容和教学实验进行取舍。使用本书时,建议讲授和实验共50学时左右,另外安排一周仿真和综合实验的专门实训。

在编写此书过程中,除参阅了出版发行的书籍外,还参阅了许多兄弟院校的自编讲义和实验指导书,并得到了武汉电力职业技术学院电工电机教研室各位老师的大力支持和帮助,对此深表谢意。

本书由程隆贵与谢红灿合编,第二章、第三章和第一章部分内容由谢红灿编写,第四、五、六章和第一章部分内容由程隆贵编写并统稿。本书由三峡大学职业技术学院的张若愚老师和周厚全老师担任主审。

限于编者的水平,书中错漏和不足之处在所难免,为此对给读者带来的不便而深表歉意,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第一章 电气测量的基本知识	1
第一节 概述	1
第二节 测量误差及其表示方法	5
第三节 电气测量仪表的误差及其准确度	8
第四节 间接测量时误差的评估	14
第五节 计算误差	15
第六节 有效数字及其运算规则	16
第七节 测量数据的记录与处理	18
第八节 电气测量仪表的种类、标志、型号及技术要求	23
第九节 电气实验概述	26
小结	28
习题一	28
第二章 电量的测量	30
第一节 电流、电压的测量	30
第二节 电功率的测量	37
第三节 功率因数和相位的测量	46
第四节 电能的测量	50
第五节 频率和周期的测量	58
第六节 波形的测量	62
小结	69
习题二	70
第三章 万用表的原理与使用	72
第一节 模拟式万用表	72
第二节 数字万用表	78
小结	85
习题三	86
第四章 电路参数的测量	87
第一节 标准器件	87
第二节 电阻的伏安法测量	91
第三节 直流电桥	93
第四节 兆欧表	97

第五节 接地电阻测量仪	99
第六节 交流电桥	101
第七节 直流电位差计	104
小结	111
习题四	112
第五章 传感器	114
第一节 传感器概述	115
第二节 电阻式传感器	119
第三节 电感式传感器	125
第四节 电容式传感器	129
第五节 热电偶传感器	132
第六节 智能测量仪器	134
小结	139
习题五	140
第六章 电气实验	141
实验一 基本电工仪表的使用及测量误差的计算	141
实验二 减小仪表测量误差的方法	144
实验三 电压表、电流表的检定	148
实验四 仪表量程扩展实验	150
实验五 电位、电压的测定及电路电位图的绘制	153
实验六 最大功率传输条件测定	154
实验七 日光灯及功率因数的提高	156
实验八 互感线圈的同名端和互感系数 M 的测定	160
实验九 三相星形负载电路	162
实验十 三相电路功率的测量	164
实验十一 单相电能表的校验	167
实验十二 故障检查	170
实验十三 电阻的测量	174
实验十四 接地电阻的测量	177
实验十五 电路元件伏安特性的测绘	178
实验十六 用直流电位差计校表	181
实验十七 典型电信号的观察与测量	183
实验十八 用双踪示波器观测 RC 移相电路	185
实验十九 R 、 L 、 C 元件阻抗特性的测定	186
实验二十 铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线	188
实验二十一 仿真实验	191
实验二十二 综合练习实验	196
参考文献	207

电气测量的基本知识

第一节 概 述

在自然界中,对任何不同的研究对象,若要从数量方面对它进行研究和评价,都是通过测量代表其特性的物理量来实现的。例如,道路的宽窄、电量的大小,都是通过测量来对它进行评价的。

一、测量的基本方程与定义

测量就是以同性质的标准量与被测量比较,并确定被测量对标准量的倍数。标准量也称为单位量。因此,测量结果由数值(大小及符号)和相应的单位两部分组成。当然测量结果也可以用曲线或图形等方式来表示,但它们同样包含具体的数值与单位。没有单位,数值是没有物理意义的。用于电流、电压、电功率等电气方面的测量属于电工测量。

设被测量为 x , 单位量为 x_0 , 测量结果的数值 A_x 为

$$A_x = \frac{x}{x_0} \quad (1-1)$$

式(1-1)称为测量的基本方程。

被测量 A_x 的数值与所选定的单位量 x_0 有关, x_0 愈大, A_x 愈小, 反之亦然。对同一被测量 A_x , 若先后用单位量 x_{01} 、 x_{02} 与之比较, 根据式(1-1), 则得

$$A_{x1} = \frac{x}{x_{01}} \text{ 和 } A_{x2} = \frac{x}{x_{02}}$$

由此可得

$$K = \frac{A_{x2}}{A_{x1}} \quad (1-2)$$

其中, K 为换算因数。

例如 x_{01} 为电流的单位量 A, x_{02} 为电流的单位量 mA, 则 $K=1000$ 。

由此可见, 用一定单位量测量某一量所得的数值, 必须乘上换算因数 K , 才能得出用新单位表示的该被测量的数值。即 $A_{x2} = KA_{x1}$ 。

将被测的电(磁)量直接或间接地与单位同类(可推算的异类)物理量进行比较的过程, 称为电气测量, 也称电工测量。

由于科学和技术的不断发展, 被测量层出不穷, 因此迫使人们去设法制定与这些量对应的测量单位。

二、单位制和单位

测量单位的确定和统一, 是非常重要的。为了对同样一个量在不同的时间、地点进行测量时, 得到相同的结果, 必须采用公认的而且固定不变的单位。为此每个国家的计量机关都以专门的“法律”来规定这样的单位。在国际范围内, 单位的通用是通过协商来加以调整的。

单位制的种类很多。为了有利于各国之间的科学文化交流, 建立统一单位制已成为各国的共同要求。

在国际单位制（代号 SI）中，包括了整个自然科学的全部物理量的单位。根据 1971 年 14 届国际权度大会的规定，它有 7 个基本单位，见表 1-1。此外，还规定了两个辅助单位，见表 1-2。

表 1-1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m	热力学温度	开（尔文）	K
质量	千克（公斤）	kg	物质的量	摩尔	mol
时间	秒	s	发光强度	坎（德拉）	cd
电流	安（培）	A			

表 1-2 国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
平面角	弧度	rad	立体角	球面度	sr

由上述 7 个基本单位，可以导出自然界中所有物理量的单位。后者称为导出单位。19 个具有专门名称的导出单位，见表 1-3。

表 1-3 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示式
频率	赫兹	Hz	s^{-1}
力，重力	牛（顿）	N	$kg \cdot m/s^2$
压力，压强，应力	帕（斯卡）	Pa	N/m^2
能量，功，热量	焦（耳）	J	$N \cdot m$
功率，辐射通量	瓦（特）	W	J/s
电荷量	库（仑）	C	$A \cdot s$
电位，电压，电动势	伏（特）	V	W/A
电容	法（拉）	F	C/V
电阻	欧（姆）	Ω	V/A
电导	西（门子）	s	A/V
磁通量	韦（伯）	Wb	$V \cdot s$
磁通量密度磁感应强度	特（斯拉）	T	Wb/m^2
电感	亨（利）	H	Wb/A
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$	
光通量	流明	lm	$cd \cdot sr$
光照度	勒（克斯）	lx	lm/m^2
放射性活度	贝可（勒尔）	Bq	s^{-1}
吸收剂量	戈（瑞）	Gy	J/kg
剂量当量	希（沃特）	Sv	J/kg

国际单位制具有严格的统一性、突出的简明性与广泛的实用性，是生产、科研、文教、贸易和人民生活广泛应用的统一单位。

我国法定计量单位，1986年7月1日起实施的“中华人民共和国计量法”规定我国的法定计量单位以国际单位制的单位为基础，并根据我国的实际情况，适当增加了一些其他单位。我国法定计量单位包括：

- (1) 国际单位制的基本单位（见表1-1）。
- (2) 国际单位制的辅助单位（见表1-2）。
- (3) 国际单位制中具有专门名称的导出单位（见表1-3）。
- (4) 国家选定的非国际单位制单位（见表1-4）。
- (5) 由以上单位构成的组合形式的单位。
- (6) 由词头和以上单位所构成的十倍数和分数单位。

三、测量仪表的基本功能

测量过程实际上是能量的变换、传递和比较的过程。例如，用水银温度计测室温时，室温被变换成玻璃管内水银柱的热膨胀位移，而温度的标准量为玻璃管上的刻度，这样被测量和标准量都变换成线位移，两者进行比较，从而读出被测量的数值（大小和单位）。

由此可见，各种测量仪表一般应具有变换、选择、比较和显示四种功能。

表 1-4 国家选定的非国际单位制单位

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
时 间	分	min	速 度	节	kn
	(小) 时	h	质 量	吨	t
	天(日)	d		原子质量单位	u
平面角	(角) 秒	($''$)	体 积	升	L (l)
	(角) 分	($'$)	能	电子伏	eV
	度	($^{\circ}$)			
旋转角度	转每分	r/min	级 差	分贝	dB
长 度	海 里	n mile	线密度	特(克斯)	tex

变换功能，变换是指把被测量按一定的规律转变成便于传输或处理的另一种物理量的过程。设被测量为 x ，经变换后输出量为 y ，它们之间的函数关系为

$$y = f(x) \quad (1-3)$$

最简单也是最理想的变换规律是变换前后 y 与 x 间的关系成比例，变换元件的这种特性叫线性特性，即同类量的变换。

选择功能，在实际的物理系统中，除了有用信号 x 外，还有许多其他影响因素等以不同程度影响输出量 y ，故有

$$y = f(x, u_1, u_2, \dots, u_m) \quad (1-4)$$

变换元件除特定的输入输出关系外，一般不希望 u_1 、 u_2 、 $\dots$ 、 u_m 等影响因素对 y 起作用，因此应具有选择有用信号、抑制其他一切无用影响因素的功能，例如选频放大器就是一例。

选择功能是测量仪表的主要功能之一，仪表性能的优劣都与选择功能密切相关。

比较功能，由测量的基本方程式(1-1)可见，要确定被测量 x 对标准量 x_0 的倍数 A_x ，比较功能是测量仪表必不可少的功能。模拟式仪表中，通常表示成仪表盘的刻度，比较过程

由测量者在读数时执行。数字式仪表中,首先将被测量转换成数码,然后与仪表内标准脉冲或标准时间进行比较,比较过程实际上是脉冲的计数过程。

显示功能,显示是人机联系的方法之一。测量的最终目的是将测量结果用便于人眼观察的形式表示出来,因此显示功能也是测量仪表必不可少的基本功能之一。模拟式仪表是用指针和刻度盘将测量结果显示出来。数字式仪表是用0~9十个数字组合,或用数字记录、打印等方式显示测量结果。

四、测量的种类

1. 测量方式

从如何得到最终测量结果的角度来分类,有以下三种测量方式。

(1) 直接测量。能够用测量仪器仪表直接获得测量结果的测量方式称为直接测量。在这种方式下,测量结果是将被测量 x 与标准量 x_0 直接比较,或者是通过使用事先刻好刻度的仪表获得的。例如用电压表测量电压,用直流电桥测量电阻等均属于直接测量。

(2) 间接测量。若被测量 x 与几个物理量之间存在某种函数关系,则可先通过直接测量得到这几个物理量的值,再由函数关系计算出被测量 x 的数值,这种测量方式称为间接测量。例如伏安法测电阻,先用电压表、电流表测出电压和电流值,然后由欧姆定律算出电阻值,这一测量过程就属于间接测量。间接测量时,测量目的与测量对象不一致。

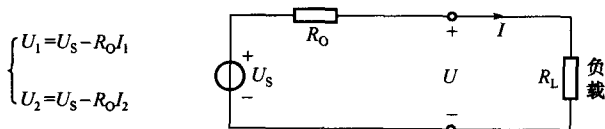


图 1-1 含源二端网络 N

(3) 组合测量。当有多个被测量,且它们与几个可直接或间接测量的物理量之间满足某种函数关系时,可通过联立求解函数关系式(方程组)获得被测量的数值,这种测量方式称为组合测量

方式。例如,含源二端网络 N 与负载连接,如图1-1所示。在图示参考方向下,其端口的伏安关系式为

$$U = U_S - R_0 I$$

为了测得开路电压 U_{OC} 和等效电阻 R_0 ,可先后改变负载电阻值,两次测取端口电压和电流值 U_1 、 I_1 和 U_2 、 I_2 ,并将它们代入上式,得到下述方程组

$$\begin{cases} U_1 = U_S - R_0 I_1 \\ U_2 = U_S - R_0 I_2 \end{cases}$$

解此方程便可求得参数 $U_{OC} = U_S$ 和 R_0 。

2. 测量方法

从如何获取测量值的手段来分类,测量方法有以下两种。

(1) 直读测量法。直接根据仪器仪表的读数得到测量值的方法称为直读法。例如,用电流表测量电流,用功率表测量功率等。直读法的特征是度量器(标准量)不直接参与测量过程。

直读法的优点是设备简单、操作简便;缺点是测量的准确度不高。

(2) 比较测量法。将被测量与标准量(或称度量器)直接进行比较而获得测量结果的方法称为比较测量法。例如,用电位差计测量电压,用电桥测量电阻等。该方法的特征是标准量(度量器)直接参与测量过程。

比较测量法具有测量准确、灵敏度高的优点,适合精密测量。但其缺点是测量操作过程

较为麻烦,所用仪器设备的价格较高。

应注意测量方式和测量方法概念上的区别。例如,用功率表测量功率既是直接测量方式又属于直读法,而用电桥测量电阻是直接测量方式,不属于直读法而属于比较测量法。

第二节 测量误差及其表示方法

在获取测量结果的过程中,由于各种因素的影响,不可避免地存在误差。误差包括测量误差和数据计算误差两类。在一般情况下前者是误差的主要来源,但后者也不可忽视。下面讨论测量误差的概念。

一、测量误差的定义

测量值与真实值(真值)之间的差异称为测量误差。测量误差的存在是绝对的,即不论采用何种测量方法,也不论怎样进行测量,测量值与被测量的实际数值总是存在差异的。

真值是被测量的绝对量,即真值是在排除了所有测量上的缺陷后通过测量而得到的量值。由此可见,任何测量都是不可能获得真值的,它只是一个理想的概念。

在科学实验和工程实际中常用满足规定的准确度要求的量值来代替真值,这种量值被认为充分地接近真值,也称之为实际值。

在测量中,应采取各种措施来减小测量结果的失真,使其逼近于真值。

二、测量误差的种类

按照测量误差的性质,可将其分为以下三类。

1. 系统误差

(1) 系统误差的概念。

若在同种条件下多次测量同一量时,误差的绝对值和符号保持不变;或在测量条件改变时,误差按某一确定的规律变化,则这样的误差称为系统误差。

系统误差按其表现出来的特点分为恒定系统误差和变值系统误差两种。若误差的数值大小和符号在测量过程中大体相同,则称之为恒定系统误差;若误差的数值和符号按某种规律变化,则称之为变值系统误差。

还可将系统误差分为已定系统误差和未定系统误差。前者是指在测量过程中其绝对值和符号已确定的误差,后者是指绝对值和符号两者之一不确定或两者都不确定的误差。

(2) 引起系统误差的原因。

1) 测量方法或测量所依据的理论不完善,也称这种原因引起的系统误差为方法误差或理论误差。

2) 测量仪器仪表本身结构原理和制作工艺上的欠完善,也称这种原因引起的系统误差为仪表的基本误差。

3) 使用仪器仪表时未能满足所规定的使用条件。例如,仪器仪表的放置方式、温度、相对湿度、频率、外电磁场干扰等不能满足仪器仪表的使用条件要求,也称这种原因引起的系统误差为仪表的附加误差。

4) 测量人员的不良测量习惯或感觉器官不完善,也称这种原因引起的系统误差为人为误差。

(3) 系统误差的主要特点。

1) 系统误差为非随机变量。系统误差的出现不服从统计规律,而是满足某种确定的函数关系。

2) 系统误差具有重现性。若测量条件不变,则重复测量时,系统误差必将重现。

3) 系统误差具有可修正性。由于系统误差具有重现性,因此可用修正值加以修正。

(4) 系统误差的消除方法。

测量中产生系统误差的原因是多种多样的,通常用于消除或削弱系统误差的做法是具体问题具体分析,有针对性地采取相应措施。

1) 引入修正值。引入修正值的主要目的是消除因仪器仪表的不完善而导致的基本误差。在测量之前对所用的测量设备用度量器或更高准确度的仪器仪表进行校准,由此作出校正曲线或校正表格。在测量时就可根据这些曲线和表格对测量数据引入修正值。

若因测量方法、测量环境和测量人员等因素所引起的系统误差,也可采用引入修正值的方法加以消除或削弱。

2) 使仪器仪表在规定的条件下工作。在测量过程中应尽量保证仪器仪表正常工作的条件,以减小或消除因各种外界环境因素所导致的附加误差。例如,在使用前对仪器仪表进行仔细的调整;合理地布局和接线以防止外来电磁场的干扰;使环境温度、电源的电压波形、频率等都符合仪器仪表所规定的要求等。

3) 采用特定的测量方法。实际测量时,若对实验数据进行仔细的分析,往往能发现因某些特殊原因引起的系统误差,这时可针对性地采取相应的特殊测量方法对系统误差加以削弱和消除。

正负误差补偿法。若系统误差为恒值误差,则对被测量在不同的试验条件下进行两次测量,其中一次所包含的误差为正,而另一次所包含的误差为负,取此两次测量数据的平均值作为测量结果,就可消除这种恒值误差。例如,用电流表测量电流,第一次测量后,将电流表转动 180° 再测一次,取两次测量数据的平均值作为测量结果,这样就可消除外磁场对仪表读数的影响。这是因为外磁场是恒定不变的,若其中一次的读数偏大,则另一次就会偏小,取两者的平均值时就会将正负误差予以抵消,从而达到了消除外磁场对测量结果影响的目的。

替代法。用一个可变的标准量代替被测量,且保持整个测量系统的工作状态不变,则仪表本身和外界因素所产生的系统误差对测量结果没有影响。

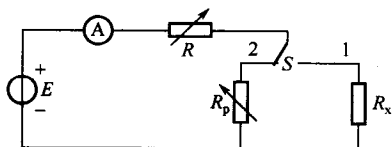


图 1-2 替代法测量电路

例如测量电阻时可采用替代法消除系统误差,测量电路如图 1-2 所示。图中 R_x 为被测电阻, R_p 为可调标准电阻, R 为可调电阻。测量时先将开关 S 合向 1, 使被测电阻 R_x 接入电路, 调节 R 使电流表的示数为一合适数值, 然后将 S 合向 2 接入可调标准电阻 R_p , 调节 R_p 使电流表的示数与接入 R_x 时的相同。若测量电路的所有其他条件不

变, 则 $R_x = R_p$ 。由此可见, 排除了系统误差对测量结果的影响。

2. 随机误差

(1) 随机误差的概念。

在同一条件下对同一量进行多次测量时所出现的误差, 是以不可预知的方式变化的误差称为随机误差。

随机误差的大小和符号没用确定的变化规律, 不可预知也不可控制。但当测量的次数增多

时, 绝对值相等、符号相反的误差出现的次数会趋于相等, 即在总体上服从一定的统计规律。

(2) 引起随机误差的原因。

随机误差出现的原因主要是周围环境对测量过程的影响, 如空气扰动、电磁场的微变、热起伏、大地微震等。

(3) 随机误差的特性。

在许多情况下, 随机误差服从于正态分布规律。这种随机误差有以下特性:

- 1) 有界性。在一定的测量条件下, 随机误差的绝对值不会超过一定的界限。
- 2) 单峰性。绝对值小的误差出现的概率大, 而绝对值大的误差出现的概率小。
- 3) 对称性。绝对值相等的正误差和负误差出现的概率基本相同。
- 4) 抵偿性。将全部的误差相加时, 几乎可相互抵消。

(4) 随机误差的消除方法。

根据随机误差的抵偿性, 在实际测量中可采用多次测量后取算术平均值的方法消除随机误差。

3. 粗大误差

明显超过规定条件下预期数值的误差称为粗大误差。这是由于测量过程中操作、读数、记录和计算等方面的错误而引起的误差。例如, 使用了有缺陷的仪器仪表, 读错、记错、算错测量数据等。粗大误差也称为疏忽误差。很明显, 含有粗大误差的测量数据是不可靠的, 应予以舍弃。

三、测量误差的表示方法

测量误差通常用以下三种方法表示。

1. 绝对误差

绝对误差 Δx 是指测量值 x 与被测量实际值 x_0 之间的差值, 即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-5)$$

绝对误差反映的是测量值在大小和方向上与实际值的差值, 其单位与被测量的单位相同。

测量时还常用到修正值的概念。修正值 C 被定义为绝对误差的负值, 即

$$C = -\Delta x = x_0 - x \quad (1-6)$$

知道了修正值, 就可由式 (1-6) 求得被测量的实际值。即

$$x_0 = x + C \quad (1-7)$$

【例 1-1】 用 PV1、PV2 两块电压表测量电路中某元件电压, 已知其实际值为 6V, 表 PV1 测量值为 5.8V, 表 PV2 测量值为 6.1V。试求表 PV1、PV2 的绝对误差。

解: 由式 (1-5) 得

$$\text{PV1 的绝对误差 } \Delta u = U_x - U_0 = 5.8 - 6 = -0.2 \text{ V}$$

$$\text{PV2 的绝对误差 } \Delta u = U_x - U_0 = 6.1 - 6 = +0.1 \text{ V}$$

上例说明, 绝对误差 Δx 是有大小、符号和单位的数值。其单位与被测量的单位是一致的, 而大小、符号分别代表测量值与真值偏差的方向和程度。PV1 的绝对误差为负, 说明其测量值比真值小, PV2 的为正, 说明其测量值比真值大; PV1 偏离真值的程度 (0.2V) 比 PV2 (0.1V) 大, 说明 PV2 比 PV1 准确。所以, 测量同一个量时, 绝对误差 Δx 的绝对值越小, 测量越准确。

2. 相对误差

绝对误差的概念反映的是测量的近似程度,但不能反映测量的准确程度,因此又引入相对误差的概念。

相对误差 γ 被定义为绝对误差与被测量的实际值之间比值的百分数,即

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-8)$$

有时因实际值 x_0 难于求出,就用测量值 x 代替实际值 x_0 , 于是有

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

相对误差是有大小和正负但无量纲的量。因它能确切地反映测量的准确程度,因此,在实际测量中一般用相对误差来评价测量结果的准确程度。

【例 1-2】 用某电压表测量 10V 电压,测量值为 9.8V。试计算其绝对误差、相对误差各为多少?

解: 绝对误差 $\Delta u = U_x - U_0 = 9.8 - 10 = -0.2 \text{ V}$

相对误差 $\gamma = \frac{\Delta u}{U_0} \times 100\% = \frac{-0.2}{10} \times 100\% = -2\%$

从 [例 1-2] 可见,绝对误差比较直观,可以看出误差的绝对数值的大小;相对误差则便于比较,更能反映测得值的可信程度。因此,测量误差的大小用相对误差表征。

3. 引用误差

引用误差又称基准误差也是一种相对误差,它用于表征仪表性能的好坏,是仪表的基本误差。引用误差 γ_n 定义为绝对误差 Δx 与仪表量程上限 x_m 之比的百分数,即

$$\gamma_n = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1-10)$$

对同一仪表来说,绝对误差在仪表刻度范围内的变化不大,但在仪表标度尺不同部位的相对误差随时分线的变化而变化,不是一个常数,且变化很大。当式 (1-8) 中的分母采用仪表量程这个数后就解决了上述问题,所以指示仪表的准确度多用“引用误差”表示。

若将式 (1-10) 中的分子取做仪表标度尺工作部分所出现的最大绝对误差 Δx_m , 则得到最大引用误差 γ_{nm} , 即

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (1-11)$$

实际中常用最大引用误差来表示电测量指示仪表的准确精度等级,两者之间的关系为

$$|\gamma_{nm}| = \frac{|\Delta x_m|}{x_m} \times 100\% \leq K\% \quad (1-12)$$

其中, K 为仪表准确度等级指标。

第三节 电气测量仪表的误差及其准确度

一、仪表的误差

电气测量指示仪表是直接将被测量转换为仪表的偏转角位移,并通过指示器在仪表标度尺上指示出被测量的数值,从而可直接读取测量结果。这类仪表历史悠久、结构简单、价格便宜,迄今仍被广泛使用。为了准确测量被测量,仪表应在规定的条件下使用。规

定的条件一般是指仪表工作的环境温度、相对湿度、使用电源的频率、波形、安放位置、外界的电场、磁场等要求,这种要求应在一个规定的范围内。当仪表工作的上述条件偏离了规定的范围,会导致构成仪表的机械零件的机械参数和介电器件的电气性能发生变化,使仪表的误差超出规定的范围。根据仪表误差产生的原因,可将仪表误差分为基本误差和附加误差。

1. 基本误差

仪表的基本误差是指仪表在规定条件下使用,由于仪表结构、工艺不够完善而产生的误差。基本误差产生的原因有以下几点:

- (1) 支撑摩擦的影响。轴尖、轴承式仪表由于轴尖、轴承之间的相互摩擦造成的误差。
- (2) 倾斜的影响。仪表的可动部分机械平衡不好而引起指示值的偏差。
- (3) 标度尺刻度失真的影响。
- (4) 游丝、张丝老化造成残余形变的影响。
- (5) 外界电磁场对测量机构内器件的影响。
- (6) 操作人员的读数的影响。

所以,基本误差是测量仪表本身所固有的一种误差。

2. 附加误差

仪表的附加误差是指仪表的工作条件偏离了规定值或规定范围所增加的误差。附加误差产生的原因有以下几点。

(1) 温度的影响,如温度的变化会造成测量机构内电阻的变化、机械零件尺寸、相对位置的改变、电子元器件的参数、工作点的变化等。

(2) 外磁场、电场的影响。仪表外部磁场的存在,如地磁场、大电流产生的磁场会增大或减小仪表本身的固定磁场,使其分布改变。而外电场的存在会在仪表内部产生静电感应,引起测量附加误差。高灵敏度检流计的指针在人体移动、手活动时都会发生摆动往往是静电感应的影响。

(3) 电源的频率、波形的影响。如电源的频率、波形对仪表测量线路中的电感、电容元件的感抗、容抗有影响,频率、波形的改变会造成仪表测量线路参数的改变。

3. 减小仪表误差的方法

减小仪表的误差就是减小基本误差和附加误差。

减小基本误差可通过选择合适的轴尖与轴承的间隙;提高轴尖、轴承工作部位的光洁程度,正确选择曲率半径;减轻仪表可动部分的重量,采用张丝支撑结构等方法实现。

附加误差一般采用补偿的方法使造成附加误差的影响因数限制为最小,常用的方法有温度附加误差补偿法和频率附加误差补偿法。

就误差的来源看,仪表的误差,是基本误差和附加误差的总和。不管是基本误差,或是附加误差,都是按一定规律变化的误差,是一种系统误差。而就误差的三种表示方法是:绝对误差、相对误差、基准误差,仪表的误差一般用基准误差表示。在规定条件下使用仪表,则基准误差可较好地反映基本误差的大小。

二、准确度

正确度、精密度、准确度这是在测量中经常被使用,也容易被混淆的名词,它们也是用来描述测量结果与真值一致程度的术语。

(1) 正确度。其反映测量结果中系统误差大小的程度。

(2) 精密度。其反映测量结果中随机误差大小的程度。测量精密度也可简称为精度。

(3) 准确度。其反映测量结果中系统误差和随机误差综合影响的程度。准确度也可称为精确度。

可见, 单纯的正确度高或精密度高并不能说明测量结果与真值(实际值)的误差小, 只有准确度高, 或者说正确度与精密度同时都高才表明测量结果令人满意。

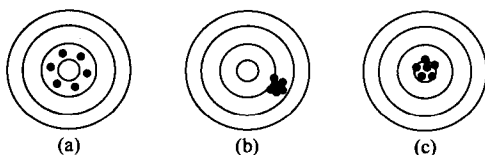


图 1-3 正确度、精密度、准确度

(a) 弹着点在靶心周围; (b) 弹着点偏离靶心较远;
(c) 弹着点在靶心附近

以打靶为例来说明上述概念。可用靶心代表真值, 弹着点代表测量值, 若未击中靶心则意味着有误差, 误差的程度表现为弹着点距靶心的距离。图 1-3 (a) 中弹着点在靶心周围, 但有一定的分散性。表明系统误差小, 随机误差大, 即正确度高, 但精密度低。图 1-3 (b) 中弹着点偏离靶心较远, 但较为集中。这表明系统误差大, 随机误差小, 即正确度低, 精密度高。图 1-3 (c) 中弹着点在靶心附近, 且较为集中。这表明系统误差和随机误差均小, 即准确度高。显然这是较为理想的打靶结果。居于靶边的弹着点则属于粗大误差。

三、指示仪表的准确精度

仪表的准确度是表征其示值对真实值的接近程度。从式(1-12)可见, 在基准误差中, 虽然仪表的基准值 X_m 是一个常数, 但随着被测量的改变, 绝对误差 Δx 也会有些变化, 为了确切描述仪表的准确性, 规定用仪表绝对误差的最大值 Δx_m 与仪表基准值的比值的百分数为仪表的准确度等级, 用 K 表示, 即

$$K\% \geq \frac{|\Delta x_m|}{X_m} \times 100\% \quad (1-13)$$

或

$$\Delta x_m = \pm K\% \times X_m \quad (1-14)$$

显然, 仪表的准确度等级大于等于最大基准误差的绝对值。在规定条件下使用仪表, 基准误差反映了基本误差, 准确度等级的要求就是可能产生的基本误差的最大值。所以, 给出仪表的准确度为 K , 就是说明在正常工作条件下使用仪表, 仪表的实际基准误差(%)应在 $\pm K\%$ 的范围内, 否则为不合格表。例如, 准确度为 2.0 级的仪表, 基准误差应在 $\pm 2\%$ 的范围内。

根据国家标准《直接作用模拟指示电测量仪表及其附件》(GB7676.2) 的规定, 电流表、电压表的准确度等级指标见表 1-5, 共有 13 级。原 GB776—1976 规定为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 共七级。

表 1-5

电流表、电压表的准确度等级

准确度等级指标	0.05	0.1	0.2	(0.3)	0.5	1.0	(1.5)
基本误差限 (%)	± 0.05	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 1.0	± 1.5
准确度等级指标	2.0	(2.5)	(3.0)	5.0	10	20	
基本误差限 (%)	± 2.0	± 2.5	± 3.0	± 5.0	± 10	± 20	

注 带括号的级别不是优选系列。

当用指示仪表测得被测量的示值为 x 时，可能产生的最大示值相对误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x} \times 100\% = \pm K\% \times \frac{x_m}{x} \times 100\% \tag{1-15}$$

由式 (1-15) 可见，示值（被测量值）愈接近仪表的量程上限，测量的误差愈小。因此，在实际测量中应尽可能使被测量在仪表量限（量程上限）的 $2/3$ 以上范围内。

【例 1-3】 用量程为 300V 的电压表，测量实际电压为 219V 的电压时，电压表的示值为 218V，试求各种误差。

解：测量的绝对误差为

$$\Delta U = U - U_0 = 218 - 219 = -1 \text{ (V)}$$

实际相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta U}{U_0} \times 100\% = \frac{-1}{219} \times 100\% = -0.456\%$$

示值相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta U}{U} \times 100\% = \frac{-1}{218} \times 100\% = -0.459\%$$

基准误差为

$$\gamma_n = \frac{\Delta U}{U_m} \times 100\% = \frac{-1}{300} \times 100\% = -0.333\%$$

【例 1-4】 某电流表的量程为 150mA，其准确度等级为 0.5 级，用其测得一电路中的电流为 122.6mA，求测量结果的示值相对误差。

解：由式 (1-14) 求得仪表产生的最大绝对误差为

$$\Delta I_m = \pm K\% \times I_m = \pm 0.005 \times 150 = \pm 0.75 \text{ (mA)}$$

又由式 (1-15) 算出其测量结果可能出现的最大示值相对差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta I_m}{I} \times 100\% = \pm \frac{0.75}{122.6} \times 100\% = \pm 0.612\%$$

指示仪表的准确度等级有三种表示方法，如 0.2、 $\surd 0.2$ 和 $\bigcirc 0.2$ 都是表示该仪表的准确度等级为 0.2 级。但意义不同：

0.2 指 $K\% \geq \frac{|\Delta x_m|}{X_m} \times 100\%$ 中基准值 X_m 为仪表量程的上限，常用于单向标度尺仪表。

$\surd 0.2$ 指 $K\% \geq \frac{|\Delta x_m|}{l_m} \times 100\%$ 中基准值 l_m 为仪表标度尺长度值，常用于标度尺是对数或量限为无穷大的仪表。

$\bigcirc 0.2$ 指 $K\% \geq \frac{|\Delta x_m|}{X} \times 100\%$ 中基准值 X 为仪表的示值。

【例 1-5】 一只量程为 100V 的电压表，在做检定时，其检定测量值记录于表 1-6，试确定该表的准确度等级。

表 1-6 电压表检定测量值记录

被检表 (V)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
标准表 (升, V)	0	9.8	19.9	29.9	39.6	50.2	60.3	70.1	79.9	89.9	99.8
标准表 (升, V)	0.7	10.8	20.7	30.2	40.1	49.6	59.3	69.8	79.7	89.8	99.8