

高等学校规划教材

电气

实验技术

DIANQI SHIYAN JISHU

主 编 郭海文

副主编 李 鹏 永智群



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等学校规划教材

电气实验技术

主 编	郭海文			
副主编	李 鹏	永智群		
参 编	刘小华	李 京	张 全	
	薛伟宁	尤文强		
主 审	滕国仁			

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是按照高等学校电工电子技术基础课程教学的基本要求,结合多年电工电子技术实践性教学环节改革的经验,并根据电工电子技术发展的形势和教学改革的需要,针对提高学生的实践能力和创新能力而进行编写的。全书力求注重学生工程实践能力和创新意识的培养,加强学生自主学习、分析问题和解决问题的能力。

全书共分为五章,主要介绍电工仪表与测量、直流电路测量与实验、交流电路的测量与实验、模拟电子技术实验、数字电子技术实验。本书编写了包括交直流电路、模拟电子技术和数字电子技术实验共 42 个,其中设计性、综合性实验 18 个。

本书可作为高等院校电气类、电子信息类及其他相近专业本科生教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气实验技术/郭海文主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2008.12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0142 - 3

I. 电… II. 郭… III. 电气—实验—高等学校—教材
IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 192946 号

书 名 电气实验技术

主 编 郭海文

责任编辑 王江涛 姜 华

责任校对 杜锦芝

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 江苏淮阴新华印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×960 1/16 印张 15 字数 286 千字

版次印次 2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

定 价 29.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

本书是按照高等学校电工电子技术基础课程教学基本要求,为适应高等学校电工电子实验教学内容和课程体系改革而编写的教材。

随着电工电子技术的快速发展以及对大学生素质培养提出的要求,着重培养学生的实践能力和创新能力,电工电子技术实验起着非常重要的作用。因此本书在编写中注重以下两个方面:一是保证传统性和创新性相结合,本书既有基本的技能测试实验,又增加了综合设计性实验,力求使学生把所学的知识融会贯通并有机地结合起来;二是实验分为验证性、设计性和综合性三个层次,以适应对不同专业、不同学时、不同层次的学生能力的培养。

全书共分为五章:第一章介绍了电工仪表与测量的基本知识,第二章介绍了直流电路的测量及直流电路实验,第三章介绍了电工仪表原理及电工基本技能实验和综合设计性实验,第四章介绍了电子仪表原理及模拟电子技术基本技能实验和综合设计性实验,第五章介绍了数字电子技术基本技能实验和综合设计性实验。

本书第一章、第五章的第一节和第二节的实验 5-1、实验 5-2 由郭海文编写,第二章和附录由李鹏编写,第三章第一节、第二节、第三节和第四章第一节、第二节、第三节由永智群编写,第三章第四节、第五节和第六节的实验 3-1 至实验 3-7 由张全编写,第三章第六节的实验 3-8 至实验 3-12 由尤文强编写,第四章第四节的实验 4-1 至实验 4-6 由刘小华编写,第四章第四节的实验 4-7 至实验 4-13 由薛伟宁编写,第五章第二节的实验 5-3 至实验 5-12 由李京编写。郭海文任主编,李鹏和永智群任副主编,滕国仁教授任主审。

本书在编写过程中,滕国仁教授对书稿进行了非常认真的审查,并提出了详细的修改意见,在此表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促和编者水平有限,错误和不妥之处敬请读者批评指正。

目 录

第一章 电工仪表与测量	1
第一节 测量方法的分类	2
第二节 电工仪表的分类.....	4
第三节 测量误差及其消除方法.....	6
第四节 工程上最大测量误差的估计.....	9
第二章 直流电路的测量与实验	14
第一节 磁电系仪表的结构和工作原理	14
第二节 磁电系电流表及电流的测量	17
第三节 磁电系电压表及电压的测量	20
第四节 磁电系欧姆表	21
第五节 带整流器的磁电系仪表	23
第六节 万用表	25
第七节 直流电路实验	29
实验 2-1 万用表的使用和电阻元件的测量	29
实验 2-2 线性有源二端网络的测量	32
实验 2-3 受控源电路的研究	35
试验 2-4 叠加原理的验证	39
实验 2-5 基尔霍夫定律的验证	42
第三章 交流电路的测量与实验	44
第一节 电磁系仪表	44
第二节 电动系仪表	48
第三节 电动系功率表和低功率因数功率表	52
第四节 功率的测量	57
第五节 感应系电度表及电能的测量	63
第六节 交流电路实验	71
实验 3-1 电感、电容元件的测量	71
实验 3-2 用三表法测量电路等效参数	75
实验 3-3 正弦稳态交流电路相量的研究	79

实验 3-4	R 、 L 、 C 串联电路的频率响应	82
实验 3-5	互感电路的测量	85
实验 3-6	三相交流电路电压、电流的测量	88
实验 3-7	三相电路功率的测量	91
实验 3-8	二端口网络参数的测量	95
实验 3-9	RC 一阶电路的响应测试	98
实验 3-10	二阶动态电路响应的研究	101
实验 3-11	三相鼠笼式异步电动机的启动和正反转控制	103
实验 3-12	单相电度表的校验	109
第四章	模拟电子技术实验	113
第一节	直流稳压电源和信号发生器	114
第二节	电子示波器	116
第三节	交流毫伏表和数字万用表	123
第四节	模拟电子技术实验	124
实验 4-1	常用电子仪表的使用	124
实验 4-2	半导体元件的测试	129
实验 4-3	单级放大器的调试与测量	133
实验 4-4	单级放大器的设计	141
实验 4-5	射极跟随器的特性测试	144
实验 4-6	负反馈放大器的调试与测量	148
实验 4-7	RC 桥式正弦波振荡器的测试	151
实验 4-8	OTL 功率放大器的调整与测试	154
实验 4-9	差动放大器的调整与测试	158
实验 4-10	集成运算放大器主要参数测试	161
实验 4-11	集成运放的线性应用	168
实验 4-12	直流稳压电源的测试	174
实验 4-13	集成直流稳压电源的设计	179
第五章	数字电子技术实验	182
第一节	数字集成电路概述	182
第二节	数字电子技术实验	187
实验 5-1	基本集成逻辑门电路功能的测试	187
实验 5-2	组合逻辑电路的测试	191
实验 5-3	编码器、译码器及数码显示电路的设计与调试	195
实验 5-4	触发器的功能测试	202

实验 5-5	计数器的设计与应用	205
实验 5-6	555 定时器的应用	210
实验 5-7	A/D、D/A 转换器的应用	213
实验 5-8	逻辑电路的设计	220
实验 5-9	多功能流水灯的设计	220
实验 5-10	8 路呼叫器的设计	222
实验 5-11	电子秒表的设计	223
实验 5-12	电话限时定时器的设计与调试	228
附录	常用电阻器和电位器	229

第一章 电工仪表与测量

电测量主要指对电流、电压、电功率、相位、频率、电阻、电感、电容以及电路时间常数、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。电测量和磁测量通称为电磁测量或电气测量。

电磁测量技术研究的是:各种电磁量的测量方法、测量中所配置的仪表和仪器设备、各种仪表设备的结构与原理、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。

电磁量是人的感官所不能觉察的物理量,对它的测量离不开仪表。早期电气测量所使用的仪表都是机械模拟式的,以后由于电气技术、电子技术以及计算机技术的不断进步,电气测量仪表也迅速发展。它的发展过程大体可以分为以下几个阶段。

在 20 世纪 50 年代以前,电气测量所使用的仪表基本以机械模拟式的仪表为主,虽然以后测量技术日新月异,但由于仪表仪器元件质量的提高,仪表生产工艺的不断改善,加上有关测量理论、测量方法的进步,这种传统的机械式模拟指示仪表已经达到相当高的水平,以电流表为例,其灵敏度就可达到 $1\ \mu\text{A}$ 。这种仪表至今仍被广泛应用。

50 年代左右,随着电子技术和控制技术的发展,在电气测量领域,除机械式模拟指示仪表外,开始发展电子式的模拟指示仪表,或称电子测量仪表,其中以高频或超高频电压表和记录仪为代表,集中体现了电子仪表的特色。

之后出现晶体管和集成电路,它们促成数字技术的进步并成功应用到测量仪器中去,从而出现电子式的数字仪表。这种仪表不但有了新的显示方法,而且为测量数据的传输开辟了一条新的途径。

到了 70 年代初,微处理器和微型计算机问世,特别是单片机得到广泛应用,从而诞生许多智能仪器。所谓智能仪器就是在传统的仪表基础上,内置微处理器或单片机,使之在测量功能和仪表性能方面发生根本性的变化。

进入 80 年代以后,计算机及其相关技术的发展更加迅速,仪器仪表和测量技术也随之打上信息时代的烙印,开始发展虚拟仪器,使之成为现代测量仪器的一个杰出代表。

新一代仪表的出现,并没有使传统仪表完全被淘汰,而是各自发挥自身的特点,使用在不同的场合,以满足不同的需要。因此,现代电气测量技术研究范围既包括传统的机械式和电子式的模拟指示仪表,也包括数字显示仪表、智能仪表和虚拟仪表。

对于从事电气技术的工作人员来讲,掌握各种仪表的原理和使用技术是十分必要的,因为不论是电气设备的安装、调试、运行、检修,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。电磁测量知识是电气技术人员必备的基础知识。本书主要介绍机械式模拟指示仪表的测量原理和测量方法。由于仪器仪表产品种类繁多,作为一门基础课程,不可能也没必要一一加以介绍,因此本书只通过典型结构,介绍相关仪表的基本概念和知识。

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的分数倍或整数倍的复制体,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所起的作用和本身的准确度,分为基准器、标准器和工作量具三种。其中基准器和标准器是由国家计量部门管理的,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和方法。按照测量结果及所需要的被测量数值如何取得可形成不同的测量方式。而根据测量数据如何读取以及度量器是否直接参与,又可形成不同的测量方法。测量的方式和方法可分为以下几种。

一、测量方式分类

1. 直接测量

直接测量是指被测电磁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,从而可以直接读出被测量的数值。这种方式的特点是测出的数据就是被测量本身的值,例如用电流表测量电流、用电桥测量电阻等,都可以直接读出被测电流或电阻的值。

2. 间接测量

如果被测量不便于直接读出,或者直接测量该量的仪器不够准确,那么就可以利用被测量与某种中间量之间的函数关系,先测量中间量,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。组合测量也用于同时测量一个函数式中的多个被测物理量。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 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 t_1 、 t_2 三种不同温度时的电阻值 R_{20} 、 R_{t1} 、 R_{t2} ,然后通过解联立方程求得 α 和 β 的值。

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

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

若式中 t_1 、 t_2 、 R_{20} 、 R_{t1} 、 R_{t2} 为已知,将这些代入式(1-1)和式(1-2),即可求出 α 和 β 。

二、测量方法分类

直接测量需要从测量中读出被测量,间接测量需要从测量中读出中间量。不论是被测量还是中间量,读取这些数据的方法都可分为直读法和比较法两种。

1. 直读法

用测量指示仪表直接读取测量数据的方法称为直读法。直读法不等于直接测量,因为测出的数据可能是中间量。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。因此,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,但准确度受仪表误差的限制。

2. 比较法

比较法是将被测量与度量器置于比较仪器上进行比较,从而求得被测量数据的一种方法。这种方法多用于高准确度的场合。当然,为保证比较结果的准确度,不仅要有较准确的仪器,测量时还要保持严格的实验条件,如温度、湿度、振动、外界电磁干扰等都不能超过规定值。根据比较时的特点,比较法又可分为以下三类。

(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 $R_x = \frac{R_1 R_0}{R_2}$ 保持恒等时,指零仪器 P 的读数为零。被测电阻 R_x 可

由 R_1 、 R_2 、 R_0 值求得。由于比较中指示仪器只用于指零,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即指示仪表灵敏度有关。

(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 ,然后根据差值 δ 求得被测量 E_x ,即

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

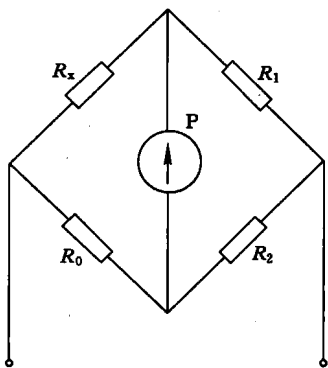


图 1-1 零值法测电阻

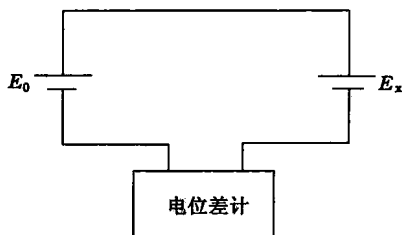


图 1-2 较差法测电动势

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 $1/1\,000$ 的误差,那么反映到被测量 E_x 中产生的误差仅为 $1/10^5$ 。

(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能保持相同,则认为替代前接在装置上的待测量与替代后的已知标准数值完全相等。当然要做到完全替代,已知标准量最好是连续可调的,这样才能在替代时通过调节使测量装置的工作状态保持不变。古代曹冲称象的原理就是替代法。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

用电的方法测量各种电磁量的仪器仪表称为电测量仪表,本书按习惯将它们统称为电工仪表。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,如温度、压力和速度等。电工仪表应用十分广泛,品种规格繁多,但归纳起来,基本上可以分为三大类。

一、模拟指示仪表

模拟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。有的时候可能不一定用指针(包括光指针),例如用液晶显示条或其他微小步进方式如数字转盘等方式指示。但工程上用得最多的还是指针式,所以通常讲的模拟指示仪表主要是指这种指针式的仪表,当然还应包括其他模拟指示方式的仪表。模拟指示仪表可以按不同方法进行分类:

(1) 按被测对象分类,可分为交直流电压表、电流表、功率表、电度表、频率表、相位表以及各种参数测量仪。

(2) 按工作原理分类,可分为磁电系、电磁系、电动系、感应系、静电系和振簧系等。

(3) 按外壳防护性能分类,可分为普通、防尘、防溅、防水、水密、隔爆以及是否具备防御外界磁场或电场影响的性能等种类。

(4) 按读数装置的结构方式分类,可分为指针式、光指示式、振簧式和数字转盘式(如电度表)等。

(5) 按使用方式分类,可分为固定安装式和可携式等。

(6) 按准确度等级分类,可分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 七个等级。

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等进行分类。

模拟指示仪表是电工仪表中生产批量最大的一种产品,其结构已相当完善,所以近年产品形式没有什么重大突破,仍停留在 20 世纪 60 年代的水平上。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。这种变换式仪表不论是什么型号,都使用统一的表芯,从而大大简化仪表的配套生产工艺,达到降低成本、方便维修的目的。

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成数字量,然后以数字方式直接显示出来。由于这种仪表采用的是数字技术,因此很容易与微处理器配合,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等多种功能。数字仪表在测量速度和精度方面都优于模拟指示仪表,但它缺乏模拟指示仪表那种良好的直观性,观察者与仪表稍有距离就可能看不清所显示的数字值。而模拟指示仪表只要能看到指针,就能大体判断出被测

量的数值,而且能从指针摆动观察被测量的变化趋势。为此近期出现一种数字与指针相结合的指示方式,这种仪表既有模拟指示,又有数字显示,可以说是模拟数字两用型。

测量各种电磁量的数字仪表通常可按被测对象进行分类,例如可分为数字频率表、数字电压表、数字欧姆表和数字功率表等。

三、比较仪器

比较仪器用于比较法测量,有直流和交流两大类,包括各类交直流电桥、交直流补偿式测量仪器以及直流电流比较仪等。比较仪器测量的准确度都比较高,所以可用于对电磁量进行较精密测量的场合。

比较仪器的结构一般包括本体(如电桥、电位差计等)、检流设备和度量器等几部分。

第三节 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,再加上测量方法、实验者本人经验以及人的感官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然发生的。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温度、湿度、放置方式、外界电场和磁场干扰等工作条件下,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。

(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。这种误差没有规律可循也难以预计,但总体服从统计规律。例如由于环境因素的突然变化、测量人员在感官方面的某种缺憾所造成的误差。

3. 疏忽误差

这是一种由于测量人员的粗心而造成严重偏离测量结果的误差,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

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-4)$$

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。如用电压表测量电压读数为 201 V,而用标准表测出的值为 200 V,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

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

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

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (1-6)$$

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 1-1 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。

$$\text{解 } \gamma_1 = \frac{\Delta_1}{A_{x1}} \times 100\% = \frac{1}{200} \times 100\% = +0.5\% \quad (1-7)$$

$$\gamma_2 = \frac{\Delta_2}{A_{x2}} \times 100\% = \frac{0.5}{20} \times 100\% = +2.5\% \quad (1-8)$$

可见前者的绝对误差大于后者,但误差对测量结果的影响却是后者大于前者。通常,用相对误差来衡量测量误差对测量结果的影响更加确切。

3. 引用误差

以绝对误差 Δ 与仪表上的量限 A_m 的比值所表示的误差称为引用误差。用 γ_n 表示为

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

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_m 与仪表上量限(即满刻度值) A_m 之比称为最大引用误差,即

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

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。式(1-10)中的分子分母都由仪表本身性能决定的,所以最大引用误差可以用来评价仪表性能。实际应用中就是用最大引用误差来表征仪表准确度等级的。

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,防止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。常用的补偿方法有:

(1) 修正误差。在测量之前,对测量所用量具、仪器、仪表进行检定,确定它们的修正值(实际值=修正值+测量值),把用这些仪器测得的数值加上修正值,就可以求得被测量的实际值。

(2) 消除误差来源。测量之前检查所用仪器设备的调整 and 安装情况,例如仪表指针是否指零,仪器设备的安放是否合乎要求,是否便于操作和读数,是否互相干扰等;测量过程中,严格按照规定的技术条件使用仪器,如果外界条件突然改变,则应停止测量;测量人员要保持情绪稳定和精神饱满。这些都可以防止系统误差。此外安排不同的测量人员对同一个量进行测量,或使用不同的方法对同一个量进行测量,也有助于发现并消除系统误差。

(3) 采用特殊的测量方法。可以采用正负误差补偿法来消除系统误差,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,将电流表位置调转 180° ,重新测量一次,取两次测量结果的平均值,可以消除外磁场带来的系统误差。

也可以使用前面讲过的替代法来消除系统误差。

2. 偶然误差的消除

多次进行测量可以发现随机误差符合统计学的规律,即符合正态分布曲线。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

$$A_0 \approx \bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad (1-11)$$

式中 $\bar{A}$ ——算术平均值;

A_0 ——真值;

n ——测量次数。

测量次数越多, $\bar{A}$ 越趋近于 A_0 。如果测量次数不够多,则算术平均值与真值偏离较大。因此用算术平均值表示测量结果时,其测量的精度可以用标准差表示,即

$$A_0 = \bar{A} \pm \sigma_x \quad (1-12)$$

式中 σ_x ——标准差。

根据概率论理论,所谓标准差可通过均方根差 σ 和剩余误差 $U_i = A_i - \bar{A}$ (A_i 为每次测量值)求得,即

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n U_i^2} \quad (1-13)$$

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,测量次数即使足够多,算术平均值也不能接近被测量的值。

例如对某一电压进行了 15 次测量,求得算术平均值为 20.18,并计算得出均方根差为 0.34,标准差 $\sigma_x = \frac{0.34}{\sqrt{15}} = 0.09$,其测量结果及其评价为

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

现在常用的电子计算机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差 3 倍以上[即 $(A_x - \bar{A}) > |3\sigma|$]的数据都认为是属于疏忽误差的数据,应予以剔除,例如上例中 U_i 大于 1.02 V 的数据都应剔除,但应注意,剔除数据后应重新计算平均值和每个数据的均方根值,直到全部数据的 $A_x - \bar{A}$ 值不超过 $|3\sigma|$ 为止。

第四节 工程上最大测量误差的估计

反映测量结果与真值接近程度的量称为精度。精度越高,测量误差愈小。所以精度在数值上可以用相对误差的倒数表示,例如测量的相对误差小于

0.1%，其精度可定为 $1/10^{-3} = 10^3$ 。

精度又分为精确度、准确度和精密度。在误差理论中，准确度用以表征系统误差的大小程度。系统误差越大，准确度就越低。精密度用以表征偶然误差的大小程度，所以测量的准确度很高，精密度不一定也很高；反之亦然。精确度是指系统误差和偶然误差的综合结果，如精确度很高，则系统误差和偶然误差均很小。

由于偶然误差一般都比较小，所以只有在进行精密测量或精密实验时才予以考虑，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，工程测量往往只注意准确度，而不考虑精密度。

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%，则该仪表的准确度等级为1级，若最大引用的误差为 γ_m ，则准确度等级为K级，有

$$K\% = \gamma_m = \frac{|\Delta_m|}{A_m} \times 100\% \quad (1-14)$$

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 ——仪表上量限。

直接测量时可能出现的最大绝对误差和最大相对误差分别是

$$\Delta_m = \pm K\% A_m \quad (1-15)$$

$$\gamma_m = \frac{\pm K\% A_m}{A_x} \times 100\% \quad (1-16)$$

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 和实际测量值 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表示的基本误差，再加上工作条件变化时的附加误差。

例 1-2 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19 A，求测量时可能出现的最大相对误差。

解

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