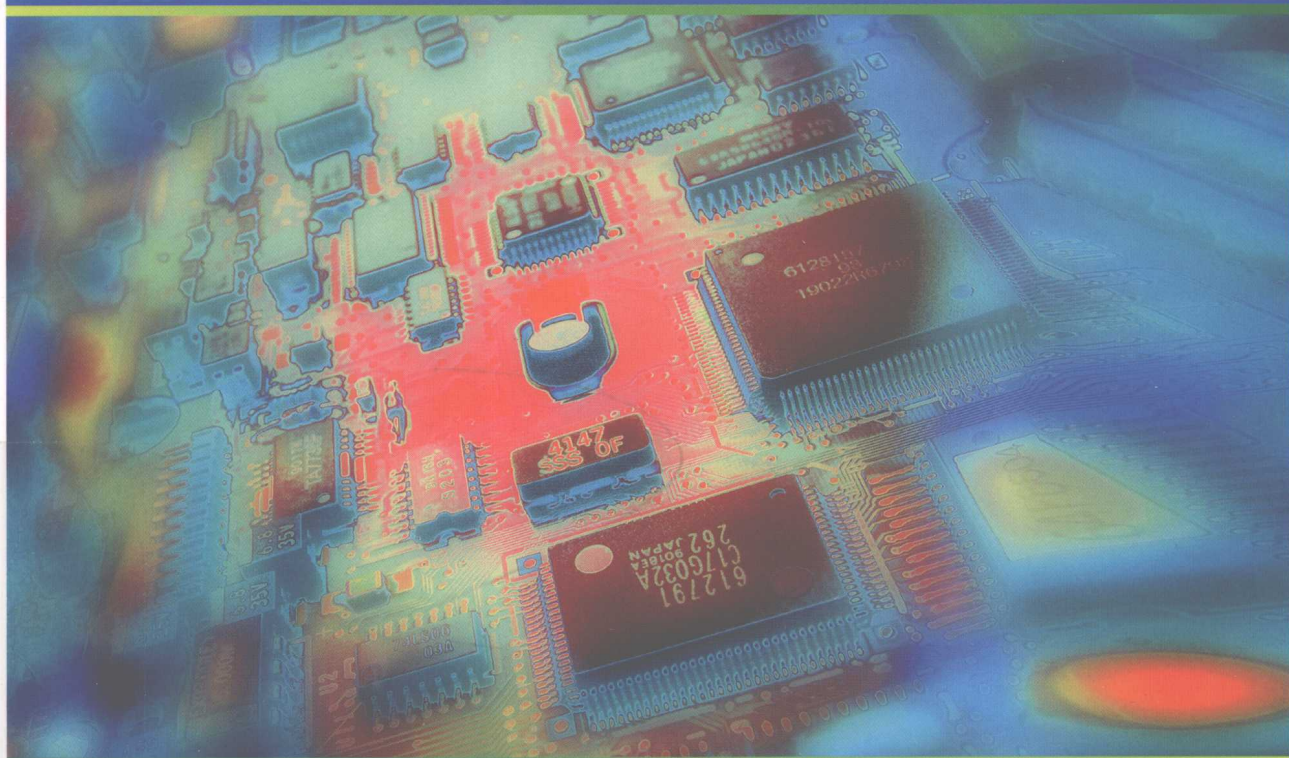


电路实验教程

主 编 刘 颖 王向军
副主编 张 民 吕井勇



国防工业出版社

National Defense Industry Press

电路实验教程

主编 王 强 副主编 王 强
编委 王 强 王 强 王 强



清华大学出版社

TM13-33/36

2008

电路实验教程

主 编 刘 颖 王向军
副主编 张 民 吕井勇
参 编 卞 强 杨 涛 张春仙

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书共分6章,第1章为电工测量基础;第2章为电路实验仪表仪器;第3章为电路实验;第4章为 EWB 电路仿真软件介绍及应用;第5章为 Pspice 电路仿真软件介绍及应用;第6章为电路故障诊断技术。第1章、第2章对电工测量技术和仪器仪表的使用作了详细的介绍,第3章是本书的核心,一共安排了20个实验,包括基础实验、综合实验、自主设计型实验、自主研究型实验。第4章、第5章、第6章安排了许多典型的上机实验,其中包括一些在电路理论课程中可能没有涉及到的内容,是对课堂所学理论知识的有益补充。

本书是大学电路课程的实验教材。是为适应国家对高等院校人材培养的需求而编写的,也可以作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路实验教程 / 刘颖,王向军主编. —北京:国防工业出版社,2008.4 重印

ISBN 978-7-118-05410-1

I. 电... II. ①刘...②王... III. 电路—实验—教材
IV. TM13-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 164487 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 12½ 字数 286 千字

2008 年 4 月第 2 次印刷 印数 4001—6000 册 定价 23.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

本书是海军工程大学本专科与《电路》、《电工基础》、《电路分析基础》、《电路基础》课程配套的实验教材,也可以作为同类院校电路实验课程的教材或者教学参考书。本书共分6章,内容安排上依次为电工测量基础、电路实验仪器仪表、电路实验、EWB电路仿真软件介绍及应用、Pspice电路仿真软件介绍及应用、电路故障诊断技术。

为了适应教学改革的要求,本书在原教材的基础上,在内容方面做了大幅度的改进。

(1) 保留了必要的基本实验。首先因为这些实验验证了电路中的一些基本概念和重要定理;其次因为在实验过程中要用到一些基本的测试方法、要使用部分基本电路测量仪器仪表,因此相关电路实验技能的培养是必需的。

(2) 增加了一些综合设计性实验。这些实验既要运用到电路课程所学的基本理论、方法,也要用到其他学科的知识,有利于调动学生的求知欲,提高分析问题和动手解决问题的能力,同时也为学生发挥自己的聪明才智提供了一个舞台。

(3) 增加了虚拟实验的内容。考虑到计算机仿真作为电路分析的重要手段已经成为当代本科教育的内容之一,本书的第4章和第5章介绍了电路设计和仿真软件EWB、Pspice,并且分别编写了几个典型的电路仿真实验,为学生提供了基本的计算机仿真实验训练和实践创新的平台,也能够为部分学生后续研究生阶段利用仿真工具的强大功能进行更深入的电路分析和设计打下基础。

(4) 电路故障诊断技术是与实验息息相关的一门技术,同时也是在电路、人工智能、计算机、测试等理论或技术基础上衍生出来的、内容广泛的交叉学科。在实验过程中适当穿插故障诊断方面的内容,有意识地让学生了解一下这方面的概念,是很有必要的。

由于实验学时和实验条件的限制,实验内容不能面面俱到,因此在编写教材中给予了适当的取舍和侧重。教材中的内容有些是必修的,有些可作为选修,可以根据电路实验教学大纲的要求做适当取舍。

在本书的编写过程中吸取了多位专家、学者的大量经验,受益匪浅。华中科技大学的汪建教授审了本书的初稿,提出了许多非常宝贵的意见;海军工程大学单潮龙教授对本书的编写也提出了一些有益的建议;国防工业出版社及崔晓莉编辑对本书的出版给予了大力支持,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中若有不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

2007年9月于武汉

目 录

第 1 章 电工测量基础	1
1.1 电工测量基本概念	1
1.2 测量数据的读取和处理	3
1.3 有效数字的计算规则和方法	5
1.4 误差产生的原因及消除	6
1.5 实验数据的图示方法	13
1.6 电路实验中常见故障及其一般排除方法	16
1.7 安全用电	17
本章小结	24
习题	24
第 2 章 电路实验仪表仪器	26
2.1 磁电式仪表	28
2.2 电磁式仪表	30
2.3 电动式仪表	32
2.4 虚拟仪器	36
本章小结	38
习题	39
第 3 章 电路实验	41
3.1 电位、电压的测定及电路电位图的绘制	41
3.2 基尔霍夫定律和叠加定理的验证	43
3.3 电路元件伏安特性的测绘	46
3.4 电压源与电流源的等效变换	48
3.5 受控源的研究	51
3.6 戴维南定理的研究(自主设计型实验)	54
3.7 三表法测量交流阻抗参数	55
3.8 功率因数的提高与测量(综合实验)	58
3.9 互感电路测量(综合实验)	62
3.10 RLC 串联谐振电路的研究	64
3.11 三相电路的研究(综合实验)	68
3.11.1 三相交流电路电压、电流的测量	68
3.11.2 三相电路功率的测量	71
3.12 R、L、C 元件阻抗特性的测定	74

3.13	双口网络(自主设计型实验)	76
3.14	回转器(综合实验)	77
3.15	负阻抗变换器(综合实验)	81
3.16	单相铁芯变压器特性的测试(综合实验)	84
3.17	RC 选频网络特性测试(综合实验)	86
3.18	RC 一阶电路的响应测试	89
3.19	二阶动态电路响应的研究(综合实验)	92
3.20	有源滤波器的设计(自主研究型实验)	93
	本章小结	100
	习题	100
第4章	EWB 电路仿真软件介绍及应用	102
4.1	EWB5.0 软件简介	103
4.2	EWB5.0 软件基本功能与操作	105
4.3	基尔霍夫定律的仿真实验	116
4.4	节点电压法的仿真实验	117
4.5	戴维南定理和诺顿定理的仿真研究	119
4.6	交流电路的仿真实验	122
4.7	三相电路的仿真研究	124
4.8	动态电路的仿真实验	125
	本章小结	129
	习题	129
第5章	Pspice 电路仿真软件介绍及应用	130
5.1	Pspice 初步	130
5.2	电路的频率特性与选频电路的仿真	143
5.3	回转器电路的设计仿真实验	144
5.4	负阻抗变换器电路的仿真实验	146
5.5	二阶电路的仿真实验	148
	本章小结	150
	习题	150
第6章	电路故障诊断技术	151
6.1	模拟电路的故障诊断	151
6.2	数字电路的故障诊断	154
6.3	电路故障诊断的实现——故障诊断装置	155
6.4	用故障字典法对电路进行故障诊断实验	156
	本章小结	160
	习题	160
附录A	KHDB-1 型高性能电工综合实验装置简介	161
附录B	万用表	165
附录C	电桥	169

附录 D 晶体管毫伏表.....	173
附录 E 信号发生器.....	176
附录 F 示波器.....	180
附录 G 有源二阶滤波电路	187
参考文献.....	193

第1章 电工测量基础

1.1 电工测量基本概念

电工测量技术是以电工基本理论为依据,以电工电子测量仪器和设备为手段,对各种电量进行测量的一门技术。电工测量是实验教学中基本技能训练的关键环节。

一、电工测量的基本概念

1. 真值

真值是表征物理量与给定特定量的定义相一致的量值,它是客观存在的,是不可测量的。在实际的计量和测量工作中,有“约定真值”和“相对真值”的概念。约定真值是按照国际公认的单位定义,利用科学技术发展的最高水平所复现的单位基准,它常常是以法律形式规定或指定的。就给定目的而言,约定真值的误差是可以忽略的。相对真值是在满足规定准确度时用来代替真值使用的值,也叫实际值。

2. 测量值

由测量仪器或设备给出的量测值。

3. 准确度

准确度是测量结果中系统误差和随机误差的综合,表示测量结果与真值的一致程度。

4. 重复性

重复性是指在相同测量程序、相同测量条件、相同测量和观测人员在相同的地点和相同的测量设备上,对同一被测量进行多次连续测量所得结果之间的一致性。

5. 误差

在实际测量中,由于测量设备不准确,测量方法不完善,测量程序不规范及测量环境因素的影响,都会导致测量结果或多或少地偏离被测量的真值。测量结果与被测量真值之差就是测量误差。

6. 测量

测量是指以获取被测对象量值为目的的全部操作。通过获得的测量值中的有用信息来认识事物、分析现象、解决问题、掌握事物发展变化的规律。

其实质是用实验的方法把被测量与标准的同类单位量进行比较,例如用电压表测量电压就是同类量的比较。被测量的量值一般由数值和相应的单位组成。例如,测得某元件两端的电压为3.2V,则测量值的数值为3.2,V(伏)是它的计量单位。一般测量结果可以表示为

$$X = xk_0 \quad (1-1)$$

式中: X 为被测量; x 为测量得到的测量值(示值); k_0 为计量单位(基准单位)。

二、电工测量的主要内容

(1) 电量的测量,包括电流、电压(电位)和功率的测量等。

- (2) 电信号特性的测量,包括频率、周期、相位、幅度、测量等。
- (3) 电路元器件参数的测量,包括电阻、电感、电容、双口网络参数等。
- (4) 电路特性的测量,包括电压源、电流源的伏安特性,无源、有源单口网络的伏安特性,频率特性的测量等。
- (5) 电路定理的验证,包括欧姆定律、基尔霍夫定理、叠加原理、戴维南和诺顿定理等。
- (6) 非电量通过传感器转化为电量后的测量,包括温度、位移、压力、质量的测量等。

三、计量单位制

中国法定的计量单位制是国际单位制(SI制)。SI制包括7个基本单位,两个辅助单位和其他导出单位。7个基本单位是m(米)、kg(千克)、s(秒)、A(安[培])、K(开[尔文])、mol(摩[尔])、cd(坎[德拉])。两个辅助单位是rad(弧度)和sr(球面度)。

所有物理量的其他单位均可用7个基本单位导出。常用的电磁学的单位有N(牛[顿])、J(焦[耳])、W(瓦[特])、C(库[仑])、V(伏[特])、F(法[拉])、 Ω (欧[姆])、S(西[门子])、Wb(韦[伯])、H(亨[利])、T(特[斯拉])等。

四、测量方式和方法

1. 测量方式的分类

1) 直接测量

在测量过程中,不必进行辅助计算而能够用测量仪器、仪表直接获得被测量的数值的测量方式称为直接测量。直接测量的测量结果就是仪表上的读数,测量结果直接由实验数据获得,被测对象与测量目的是一致的。

2) 间接测量

若被测量与几个物理量存在某种函数关系,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的数值,这种测量方式称为间接测量。间接测量时,被测对象与测量目的是不一致的。例如:本书第三章实验7用的就是间接测量。

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方程组获得被测量的数值,这种测量方式称为组合测量。

2. 测量方法的分类

1) 比较测量法

将被测量(未知量)与标准量(已知量)直接进行比较而获得测量结果的方法称为比较测量法。该方法的特征是标准量(度量器)直接参与测量过程。

其优点是测量准确、灵敏度高,适合精密测量。但其缺点是测量操作过程麻烦。

直读测量法在实际测量工作中应用较多,而比较测量法由于测量准确度高,所以常用于精密测量。

2) 直读测量法

用直读式仪表直接读取被测量值的方法称为直读测量法。直读式仪器可以是指示式仪表,也可以是数字式仪表。例如,用电压表测量电压,用电流表测量电流,用功率表测量功率等。直读测量法的特征是度量器(标准量)不直接参与测量过程。其优点是设备简单、迅速、操作简便等;缺点是测量的准确度不高。

1.2 测量数据的读取和处理

测量过程中如何从仪器仪表上正确地读取数据,并对数据进行整理、分析和计算,按照技术标准作出正确判断,这是测量人员必须掌握的基本技能,也是电工测量中必不可少的工作。

一、测量数据的读取

1. 指针式仪表测量数据的读取和有效数字的位数

指针式仪表的示值称为直接读数,是指针所指示的标尺值,通常是用格数表示的。使用之前,应使仪表的指针回零,如果指针不在零的位置,可通过调节调零旋钮使指针回零。指针式仪表在读数时,应使视线与仪表标尺平面垂直,如果表盘上带有平面镜,读数时应使指针与其镜像重合,并读取足够的位数,以减小和消除视觉误差,提高读数的准确性。为减少测量误差,一般应采取多次测量后取平均值的方法。指针式仪表测量数据的读取要注意以下3个问题。

测量时应首先记录仪表指针读数的格数。

指针式仪表的标度尺每分格所代表的被测量的大小称为仪表常数,也称为分格常数,用 C_a 表示,其计算式为

$$C_a = x_m / a_m \quad (1-2)$$

式中: x_m 为选择的仪表量程; a_m 为指针式仪表满刻度格数。对于同一块仪表,选择的量程不同则分格常数也不同。当被测电功率 $P = U_N I_N \cos \varphi_N$ 时,仪表指针将满刻度偏转,因此,低功率因数功率表的分格常数为

$$C_p = \frac{U_N I_N \cos \varphi_N}{\alpha_m} (\text{W/格}) \quad (1-3)$$

式中: α_m 表示功率表刻度尺的满刻度格数; $\cos \varphi_N$ 是低功率因数功率表的额定功率因数,它的数值在仪表的表盘上标明,例如 D64 型单相功率表的 $\cos \varphi_N = 0.2$ 。

从表 1.2-1 中可知, D64 型单相功率表对于不同的电压、电流量程,其分格常数 C_p 的数值不同。应当强调指出,仪表上标明的额定功率因数 $\cos \varphi_N$ 并非被测负载的功率因数,而是制造该仪表的一个参数,即在该表设计刻度时,在额定电流、额定电压下使指针满刻度时的功率因数。

表 1.2-1 D64 型单相功率表分格常数 C_p

电压量程/V 电流量程/A	75	150	300	450
0.5	0.05	0.1	0.2	0.3
1	0.1	0.2	0.4	0.6

测量数据的示值是指仪表的读数对应的被测量的测量值,它可由下式计算得出:

$$\text{示数} = \text{读数(格)} \times \text{分格常数 } C_a$$

示值的有效数字的位数应与读数的有效数字的位数一致。

例如:如果某型功率表的电压量程 $U_N = 150\text{V}$,电流量程 $I_N = 1\text{A}$,该表的满偏格数为 150 格,测量时指针偏转格数为 70 格,问测得的负载功率是多少?

解:分格常数为

$$C_p = \frac{U_N I_N \cos \varphi}{\alpha_m} = \frac{150 \times 1 \times 0.2}{150} = 0.2$$

负载功率为

$$P = 0.2 \times 70 = 14 (\text{W})$$

2. 数字式仪表测量数据的读取

数字式仪表的读出数值无需换算即可作为测量结果的读取数据。但是测量时,数字式仪表量程选择不当,会丢失有效数字,因此应注意合理地选择数字式仪表的量程。

3. 测量结果的正确填写

在进行电路实验时,最终的测量结果通常由测得值和仪表在相应量程时的最大绝对误差共同表示。

实验测量中,采用的是进位方法,误差的有效数字一般只取一位,即只要有效数字后面应予舍弃的数字是1~9中的任何一个时都应进一位。

注意:在测量结果的最后表示中,测得值的有效数字的位数取决于测量结果的误差,即测得值的有效数字的末位数与测量误差的末位数是同一个数位,下面分别介绍指针式仪表和数字式仪表测量数据的读取方法。

二、数据处理

由于数据采集的方法、方式不同,运算方法和实验者的经验不同,数据处理的结果差别较大,数据处理是将实验中获得原始测量数据进行运算和分析,从而得出结论。因此要注意以下两点。

1. 数据的排列

为了便于分析、计算,而将原始测量数据按一定的顺序排列。

2. 坏值的剔除和数据补充

在测量数据中,有时会出现偏差较大的测量值,它分两类:一类是坏值,是因为随机误差过大而超过了给定的误差界限,应予以剔除;另一类是极值,是因为产生的随机误差较大,但未超过规定的误差界限,应予保留。在测量数据的处理过程中,有时会遇到缺损的数据,或者需要知道测量范围内未测出的中间数值,这时可采用线性插值法、一元拉格朗日插值法和牛顿插值法等方法来补充这些数据。

三、测量数据的表示方法

1. 绘图表示法

测量数据的绘图表示法的优点是直观、形象,能清晰地反映出变量间的函数关系和变化规律。测量结果的绘图表示法通常分3步进行:首先选择适当的坐标系和各坐标的分度单位,即坐标上每一格所代表的数值大小;然后把测量后已处理的数据分别标示在图中,最后绘出曲线。

2. 列表法

列表法便于数据的比较和检验,是实验数据最基本和最常用的表示方法。以下是列表法的要点。

(1) 首先对原始测量数据进行整理,作有关数值的计算,剔除坏值等。

(2) 确定表格的具体格式,合理安排表格中的自变量数据和因变量数据。一般将能

直接测量的物理量选作自变量。

(3) 在表头处给出表的编号和名称,在表尾处对有关情况予以说明。

(4) 数据要有序排列,表中数据应以有效数字的形式表示。

(5) 表中的各项物理量要给出其单位。

1.3 有效数字的计算规则和方法

一般认为,测量数据位数取得越多,数据就会越准确,计算结果的准确度越高。有些时候,读取数据的位数过多,不仅不能提高测量数据的准确度,反而使计算量大大增加;若读取数据的位数过少,显然会增大误差。因此,需要掌握有效数字的运用方法。

一、有效数字的概念及有效位数的确定

在测量中读取的测量数据,除末位数字可疑欠准确外,其余各位数字都应是准确可靠的。末位数字是估计出来的,因而不准确。

测量数据最后一位数字必须是欠准数字。欠准数字为 0 时,也必须写出来。从测量数据的第一个非 0 数字到欠准数字的所有数字都是有效数字,有效数字的个数就是有效位数。通常说的某数有 n 位有效数字,指的就是有效位数为 n 。

在读取和处理数据时,有效数字的位数要合理选择。使所取得的有效数字的位数与实际测量的准确度一致。测量结果未标明测量误差时,一般认为其误差的绝对值不超过末位有效数字单位的 $1/2$ 。

有效位数的确定应该遵循如下原则:

(1) 右边含若干个零的整数可以用科学记数法表示为含不同有效位数的数。

(2) 有效位数确定后,小数点右边有零时,不能随意删去零,也不能在小数点右边随便增添零。

(3) 有效数字位中,左边第一位数不能是零。

二、有效数字的表示方法和运算修约规则

记录测量数值时,每一个测量数据都应保留一位欠准数字,即最后一位前的各位数字都必须是准确的;应特别注意数字 0 的作用,数字零可能是有效数字,也可能不是有效数字;大数值与小数值都要用幂的乘积的形式来表示;并非数字的位数保留得越多越好,而是要按照有效数字的位数保留数字,这种处理数字的方式通常称为“修约”。在计算中,常数 π 、 e 等以及因子的有效数字的位数没有限制,可以认为它的有效数字的位数是无限多的,需要几位就取几位;当有效数字位数确定以后,多余的位数应一律按四舍五入的规则舍去。

当有效位数确定后,可对有效位数右边的数字进行处理,即把多余位数上的数字全舍去,或舍去后再向有效位数的末位进一。这种处理方法叫作数的修约,它与传统的“四舍五入”方法略有不同。如果取 N 位有效数字时,对超过 N 位的数字就都要进行修约。应用“四舍五入”规则,当第 $N+1$ 位数字大于 5 时,由于“只入不舍”,会产生累计误差。因此,若要保留 N 位有效数字,对数字进行处理时,通常采用如下的修约规则。

(1) 若第 $N+1$ 位上的数字小于 5,则舍去,大于 5,则向第 N 位进 1。

(2) 若第 $N+1$ 位上的数字恰好为 5,而第 $N+1$ 位后面数字不全为零,则向第 N 位

进 1。

(3) 若第 $N+1$ 位上的数字恰好为 5, 而其后无数字或全部为 0, 当第 N 位数字为奇数时, 则向第 N 位数进 1, 当第 N 位数字为偶数(包括 0)时, 则舍去 5 不进位, 即“奇进偶不进, N 位为偶数”。

数据进行加减运算时, 准确度最差的数就是小数点后面有效数字位数最少的。加减运算的规则与小数点的位置有关, 其和的小数位数与标准数的小数位数相同。因此, 若几个小数位数不同的有效位数相加时, 以小数点后面有效数字位数最少的数据为准, 把其余各数据的小数点后面的位数修约成比标准数的小数位数多一位的小数, 然后再进行运算。运算结果所保留的小数点后面的位数和准确度最差的数相等。

1.4 误差产生的原因及消除

电工测量中, 误差是客观存在的, 这与我们对客观事物认识的局限性、测量方法的不完善以及测量工作中常有的各种失误等密切相关, 不可避免地使测量结果与真值之间有差别, 这种差别就称为测量误差。对误差理论的研究, 就是要根据测量误差的规律, 在一定测量条件下尽力设法减小测量误差, 并根据误差理论合理地设计和组织实验, 正确地选用仪器、仪表和测量方法, 误差大致分为仪表误差和测量误差。

一、仪表误差及其产生原因

仪表误差是指仪表的测量值与被测量真值之间的差异。测量值与真值之间的差异越小, 则测量值越准确, 仪表的准确度就越高, 它的误差就越小。无论仪表的设计和制造工艺及安装如何力求完善, 仪表的误差总是存在的, 根据误差产生的原因将仪表误差分为两类。

1. 基本误差

在规定的工作条件下, 由于仪表本身的内部特性和质量方面的缺陷等所引起的误差, 叫作基本误差。引起基本误差的因素很多, 属于基本误差的有摩擦误差、轴隙误差、不平衡误差, 标度尺分度和装配不正确误差、游丝(张丝、吊丝)永久变形的误差、读数误差和内部电磁场误差等。指针式仪表的零点漂移、刻度误差以及非线性引起的误差, 数字式仪表的量化误差, 比较式仪器中标准量本身的误差均属于此类误差。

2. 附加误差

在实际使用仪表时, 规定的工作条件经常得不到满足, 例如仪表的工作位置倾斜, 气温过高或过低, 电流波形非正弦, 频率偏离额定值, 仪表周围存在外磁场或外电场的影响等, 都会使仪表的量测值与被测量的真值之间产生附加的差异, 这就是附加误差。也就是说, 当仪表不是在规定的正常工作条件下使用时, 仪表的总误差中除基本误差外, 还包含有附加误差。

根据电工测量仪表基本误差的不同情况, 国家标准规定了仪表的准确度等级 K , 分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 等 7 级。如果仪表为 K 级, 说明该仪表的最大引用误差不超过 $K\%$, 而不能认为它在各刻度点上的示值误差都具有 $K\%$ 的准确度。假设某仪表的满刻度值为 x_m , 测量点 x , 则该仪表在 x 点邻近处的示值误差和相对误差为

(5-1)

$$\begin{cases} \Delta x_m = \pm x_m \times K\% \\ r = \pm \frac{x_m}{x} \times K\% \end{cases}$$

二、测量误差的产生原因、分类以及消除

测量误差在任何测量中总是存在的。一般而言,测量工作的意义完全取决于测量的准确度。对于不同的测量,对误差大小的要求也是不同的。

1. 测量误差产生的原因

1) 仪器仪表误差

仪器仪表本身的误差称为仪器误差,这是测量误差的主要来源之一。

2) 方法误差

由于测量方法不合理而造成的误差称为方法误差。例如,用普通万用表测量高内阻回路的电压是不合理的,由此引起的误差就是方法误差。

3) 理论误差

由于测量方法建立在近似公式或不完整的理论基础之上,或是用近似值来计算测量结果,则由此引起的误差称为理论误差。

4) 环境误差

由于环境因素与要求的条件不一致而造成的误差称为影响误差。环境误差也是测量误差的主要来源之一。例如,当环境温度、预热时间或电源电压等因素与测量要求不一致时,就会产生环境误差。

5) 人身误差

由于测量者的分辨能力、疲劳程度、固有习惯或责任心等因素引起的误差称为人身误差。例如,对测量数据最后一位数的估读能力差,念错读数,习惯斜视等引起的误差均属于此类误差。

2. 测量误差的分类

按测量误差的性质和特点,误差可以分为绝对误差、相对误差、引用误差、允许误差。

1) 绝对误差

绝对误差定义为测量值与真值之差用 Δx 表示,即

$$\Delta x = x - A \quad (1-4)$$

式中: x 为测量值; A 为被测量的真值; Δx 为绝对误差。一般来说,除理论真值和计量学约定真值外,真值是无法精确得知的,只能使测量结果尽量地接近真值。因此,式(1-4)中的真值 A 通常用准确测量的实际值 x_0 来代替,即

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

式中: x_0 为满足规定准确度,可由高级标准测量仪器测量获得的实际值,用来近似代替真值。绝对误差具有大小、正负和量纲。在实际测量中,除了绝对误差外还经常用到修正值的概念。它的定义是与绝对误差等值但符号相反的值,即

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

知道了测量值 x 和修正值 C ,由式(1-6)就可以求出被测量的实际值 x_0 。测量仪表的修正值一般是通过计量部门检定给出,从定义不难看出,仪表的测量值加上修正值就可获得相对真值,即实际值。实际值表示为

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

2) 相对误差

在测量实践中,测量结果准确度的评价常常使用相对误差,因为相对误差是单位测量值的绝对误差,与被测量的单位无关,它是一个纯数。由于相对误差符合人们对准确程度的描述习惯,也反映了误差的方向,因此,在衡量测量结果的误差程度或评价测量结果的准确程度时,一般都用相对误差来表示。

绝对误差只能表示某个测量值的近似程度。对于两个大小不同的测量值,不能用绝对误差来反映测量的准确程度。为了衡量测量值的准确程度,引入了相对误差的概念。相对误差定义为绝对误差与真值之比,一般用百分数形式表示,即

$$r_0 = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% = \frac{x - A}{A} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中: r_0 为相对误差; Δx 为绝对误差; A 为被测量的真值。这里的真值 A 也用约定真值或相对真值代替。但在约定真值和相对真值无法知道时,往往用测量值代替,即

$$r = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-9)$$

一般情况下,在误差比较小时, r_0 和 r 相差不大,无需区分,但在误差比较大时,两者相差悬殊,不能混淆。为了区分,通常把 r_0 称为真值相对误差或实际值相对误差,而把 r 称为测量值(示值)相对误差。

3) 引用误差

相对误差可以较好地反映某次测量的准确度。对于连续刻度的仪表,用相对误差来表示在整个量程内仪表的准确度,就不方便了。引用误差是为了评价测量仪表的准确度等级而引入的。因为在仪表的量程内,被测量有不同值。若用式(1-9)来表示仪表的相对误差,随着被测量的不同,式中的分母也在变化;而在一个表的量程内绝对误差变化较小,则求得的相对误差将改变。因此,为计算和划分仪表准确度的方便,提出了引用误差的概念。引用误差是简化的、实用的一种相对误差的表现形式,在多挡和连续刻度的仪表中应用。这类仪表的可测范围不是一个点,而是一个量程。为了计算和划分准确度等级的方便,通常取仪表量程中的测量上限(满刻度值)作为分母,由此引出引用误差的概念。引用误差定义为绝对误差与测量仪器量程(满刻度值)的百分比,即

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

式中: r_n 为引用误差; Δx 为绝对误差; x_m 为测量仪表量程的上限值。测量仪表的准确度也称为最大引用误差,定义为仪表在全量程范围内可能产生的最大绝对误差 $|\Delta x_m|$ 与仪表量程的上限值 x_m 的比值,即

$$r_{\max} = \frac{|\Delta x_m|}{x_m} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中: $r_{\max}$ 为最大引用误差,也称为基本误差。

在国家标准 GB 776—1976《测量指示仪表通用技术条件》中规定,电工指示仪表的准确度分为 7 级,如表 1.4-1 所列。仪表的基本误差不能超过准确度等级 K 的百分数,即:

$$r_{\max} \leq K\%$$

表 1.4-1 常用电工批示仪表的准确度等级分类表的准确度等级

准确度等级 K	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
误差范围/%	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5.0

如果知道某仪表的准确度等级为 K 级,它的量程上限值为 x_m ,被测量的实际值为 x 时,则测量的绝对误差为

$$|\Delta x_m| \leq x_m \times K\% \quad (1-12)$$

按照上面的规定,测量仪表在使用时,产生的最大可能误差可确定为

$$\begin{cases} \Delta x_m = \pm x_m \times K\% \\ r = \pm \frac{x_m}{x} \times K\% \end{cases} \quad (1-13)$$

当仪表的等级 K 选定后,测量中绝对误差的最大值与仪表的上限 x_m 成正比。同样由式(1-13)可知,因为 $x_m \geq x$,当仪表的 K 选定后, x 越接近 x_m ,测量的相对误差的最大值就越小,测量越准确,因此,在选用电工仪表测量时,一般使测量的数值尽可能在仪表上限的 $2/3$ 以上,不能小于仪表上限的 $1/3$ 。

测量结果的准确度才等于仪表的准确度,切不要把仪表的准确度和测量结果的准确度混为一谈。选择仪表时不要单纯追求高准确度,应当根据测量准确度的要求合理选择仪表的准确度等级和仪表的测量上限。为了充分利用仪表的准确度,被测量的值应大于仪表测量上限的 $\frac{2}{3}$,这时仪表可能出现的最大相对误差为

$$r_{\max} = \pm \frac{x_m}{x_m \cdot 2/3} \times K\% = \pm 1.5K\%$$

即测量误差不会超过仪表准确度等级数值百分数的 1.5 倍。根据同样道理,当用高准确度等级的指示仪表检验低准确度等级的指示仪表时,两种仪表的测量上限应选择得尽可能一致。

4) 允许误差

允许误差是指测量代表在使用条件下可能产生的最大误差范围,是衡量测量仪表的最重要的指标。测量仪表的准确度、稳定度等指标都可用允许误差来表征。允许误差可用工作误差、固定误差、影响误差、稳定性误差来描述。

(1) 工作误差。工作误差是在额定工作条件下仪器误差的极限值,即来自仪表外部的各种影响和仪表内部的影响特性为任意可能的组合时,仪表误差的最大极限值。这种表示方式的优点是使用方便,即可利用工作误差直接估计测量结果误差的最大范围。不足的是,由于工作误差是在最不利组合下给出的,而在实际测量中最不利组合的可能性极小,所以由工作误差估计的测量误差一般偏大。

(2) 固有误差。固有误差是当仪表的各种影响量和影响特性处于基准条件下仪表所具有的误差。由于基准条件比较严格,所以固有误差可以比较准确地反映仪表所固有的性能,便于在相同条件下对同类仪表进行比较和校准。

(3) 环境误差。环境误差是当一个影响量处在额定使用范围内,而其他所有影响量处在基准条件时,仪表所具有的误差,如频率误差、温度误差等。

(4) 稳定性误差。稳定性误差是在其他影响和影响特性保持不变的情况下,在规定