

21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century



电工测量技术

DIANGONG CELIANG JISHU

俞俊民 主 编



中国电力出版社

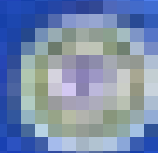
<http://jc.cepp.com.cn>

中国电力出版社



电工测量技术

第2版



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TM93/106

2007

21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century



电工测量技术

DIANGONG CELIANG JISHU

主 编 俞俊民
编 写 于文波
主 审 霍 龙 厉 伟



中国电力出版社

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

内 容 简 介

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书主要是为适应综合实验台而编写的。本书由以下两部分组成：一是误差分析与测量仪表简介，包括传统的误差分析计算的方法和不确定度，以及常用电工仪表的结构、原理及使用等；二是电工实验技术，共编排了 31 个实验项目，包括直流、交流、单相、三相及回转器、负阻抗变换器等新器件的实验，此外还有仪表方面的实验。

本书可作为高等院校电气信息类及相关专业的本科教材，也可作为高职高专或函授教材，同时可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工测量技术/俞俊民主编. —北京：中国电力出版社，
2007

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 6008 - 9

I. 电… II. 俞… III. 电气测量—高等学校—教材
IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 125780 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 9 月第一版 2007 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.25 印张 243 千字

印数 0001—3000 册 定价 16.00 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

近 20 年, 电工实验台——这种综合电工实验装置, 已在国内各个高校普遍应用, 其中以浙江天煌公司和求是公司的产品居多, 其他厂家的产品在结构和组成上也与这两家公司相近的。但目前国内适应这种实验台而公开出版的电工测量方面的书籍以及电工实验指导书还很少, 厂家提供的指导书往往与教学要求有不小的差距。故此, 作者编写此书, 以满足教学的需要。

本书尝试着在电工测量和电工实验中引入不确定度的内容, 使学生接触和了解误差理论和误差应用的新发展、新动态, 拓展学生的眼界和思路, 使教学内容与国际接轨。本书在实验内容的选择上, 力求全面多样, 尽量覆盖电工实验的主要内容。

本书的实验十、十一、十三、十七、十九、二十、二十三、二十四、二十五和实验二十六由沈阳工程学院于文波编写, 其余内容由沈阳工程学院俞俊民编写, 全书由俞俊民负责主编。

本书由沈阳工程学院霍龙教授和沈阳工业大学厉伟教授主审, 编者对两位教授提出的宝贵意见表示感谢。

由于编者水平有限, 加之时间仓促, 书中的缺点和不妥之处在所难免, 敬请广大读者和师生批评指正。

编 者

2007 年 6 月

目 录

前言

绪论..... 1

第一篇 误差分析与测量仪表简介

第一章 测量误差与数据处理.....	4
第一节 测量方法与误差	4
第二节 仪表的准确度	7
第三节 测量误差的分类	9
第四节 测量结果的不确定度的估算及测量结果表示.....	11
第五节 实验结果的数据处理和图解处理	21
思考题与习题	26
第二章 常用电工仪表与仪器介绍	28
第一节 电工仪表的基本知识	28
第二节 直接作用模拟指示电测量仪表的组成和原理.....	32
第三节 磁电系仪表.....	34
第四节 数字电压表及数字万用表	40
思考题与习题	42

第二篇 电 工 实 验 技 术

实验一 磁电式仪表电压、电流量程的扩展	44
实验二 电压表、电流表内阻的测量与不确定度的估算	48
实验三 减小仪表测量误差的方法	52
实验四 欧姆表的制作与校验	56
实验五 电阻元件伏安特性的测量	59
实验六 电位、电压的测定及电路电位图的绘制	63
实验七 基尔霍夫定律的验证与电路故障处理	66
实验八 线性电路叠加性和齐次性的研究	70
实验九 电压源、电流源及其等效变换的研究	73
实验十 戴维宁定理与诺顿定理验证	77
实验十一 最大功率传输条件的研究	81
实验十二 受控源研究	83

实验十三	直流无源二端口网络的研究	89
实验十四	特勒根定理与互易定理的验证	94
实验十五	一阶电路暂态过程的研究	99
实验十六	二阶电路暂态过程的研究	102
实验十七	正弦稳态交流电路相量的研究	105
实验十八	观测周期性信号的有效值、平均值和幅值	108
实验十九	正弦交流电路中器件的等效参数测定	111
实验二十	功率因数提高的研究	115
实验二十一	交流电路频率特性的测定	118
实验二十二	RC 网络频率特性和选频特性的研究	121
实验二十三	R、L、C 串联谐振电路的研究	124
实验二十四	耦合绕组电路的研究	127
实验二十五	三相电路电压、电流的测量	131
实验二十六	三相电路功率的测量	135
实验二十七	功率因数表的使用及相序测量	141
实验二十八	负阻抗变换器	143
实验二十九	回转器特性测试	146
实验三十	单相铁心变压器特性的测试	149
实验三十一	单相电能表的校验	152
参考文献		155

绪 论

实验是科学技术发展的重要组成部分,无论是基础科学的研究还是应用技术的研究都要进行大量的实验。从事任何实验都要求实验人员具备相应的理论知识、实验技能及归纳总结实验结果的能力。电工测量及电工实验(或称测量实验技术)是工科领域最基本的实验环节,所涉及的内容包括电路理论、基本电工测量仪器仪表的使用及基本测量方法等,其基础性决定了它在电类本科和专科教学进程中,起到提高学生专业理论水平、培养学生的工程意识、训练学生基本实验技能的奠基作用。

一、电工测量及电工实验的目的

电工测量及电工实验是理工科院校电类专业学生的一门必修课程,它可以为实验方法的学习、工程意识的培养和技能训练打下基础。学习本课程的主要目的如下。

(一) 培养和提高学生从事工程实践和科学实验的基本素质

通过电工测量及电工实验,使学生掌握实验基本原理,学会基本的测量方法,了解常用仪器仪表的基本结构原理和使用方法,熟悉数据的正确采集和实验后的数据处理及实验结果的分析,能写出完整的实验报告。这些基本素质是学生今后进行技术研究、开发和工程实践所必不可少的。

(二) 培养学生的工程意识及解决实际问题的能力

工程意识的培养也需要一个过程。实验中会观察到各种现象,遇到各种问题,出现各种故障,甚至会出现各种因素交织在一起的复杂故障。熟练应用理论知识对其加以分析解决,不但能加深对理论知识的理解,而且能培养学生理论联系实际的思路,培养学生的工程意识;能提高学生综合运用知识的能力,提高学生解决实际问题的能力。

(三) 培养学生安全操作的习惯及严谨、求实的科学态度和工作作风

电工测量及电工实验本身的特点,要求学生必须养成安全操作的习惯,否则不但不能完成实验任务,而且容易造成设备、仪表损坏,甚至人身伤害。对实验的每个环节,如原理的掌握、仪器的调整、数据的采集、数据的处理、结果的评估、写出报告等做严格要求,将会不断地培养学生严谨、求实的科学态度和工作作风。

二、电工测量及电工实验的要求

为了高质量地完成电工测量及电工实验的教学任务,教师要对学生提出严格要求,具体如下。

(一) 实验预习

设计任何电路实验都有一定的目的,并为此提出实验任务。预习时,要正确地应用基本理论分析清楚实验原理;综合考虑实验环境和实验条件,明确所设计的实验及提出任务的可行性;预测实验结果并写出实验报告。其中包括以下几方面。

(1) 认真阅读实验教材及有关参考书,明确实验目的、原理、仪器仪表、实验方法、操作步骤及注意事项。

(2) 写出预习报告,其内容大致有:实验名称、原理、仪器仪表及注意事项和原始数据

表格等。无预习报告者不得参加实验。

（二）实验操作

实验操作是在详细预习报告的指导下，在实验室进行的整个实验过程，包括熟悉、检查及使用实验器件与仪器仪表，连接实验电路，实际测试与数据的记录及实验后的整理工作等。

1. 要了解《学生实验守则》

2. 实验操作注意事项

实验前要检查仪器仪表是否完好，量程是否合适，了解仪器仪表的性能及使用方法和注意事项，然后按要求接线和调试，准备就绪，方可进行操作并记录必要的数据和现象。主要注意事项如下。

（1）实验线路的连接——是建立实验系统最关键的工作。

1) 要能够按电路原理图连接实际电路。连接顺序一般是先串后并，先主后辅（先主电路，后辅助电路）。对连接完的电路做细致检查，是保证实验顺利进行、防止事故发生的重要措施，因此不能丝毫疏忽。

2) 正常情况下，连接好实验线路后，即可开始实验测量工作。但有时也会出现一些意想不到的故障，必须首先排除故障，以保证实验的顺利进行。

（2）实际测试与记录数据——是实验过程中最重要的环节。

1) 在测试过程中，可能也会出现故障报警，要及时分析原因，排除故障后，再进行实验，不可盲目操作，慌乱应对。这是一切实验的大忌，更是电工实验及从事电类技术工作的大忌。

2) 测试中，应尽可能及时地对数据做初步的分析，以便及时地发现问题，当即采取可能的必要措施以提高实验质量。

3) 实验做完后，不要忙于拆除实验线路。应先切断电源，待检查实验测试没有遗漏和错误后再拆线。如发现异常，须在原有的实验状态下查找原因，并做出相应的分析。

（3）实验结束后。

1) 检查所用仪器仪表的完好情况，将导线整理成束放在抽屉里。

2) 填写“实验日志”。

3) 请教师检查所记录的原始数据，并在原始数据记录单和“实验日志”上签字（原始数据记录单须附在实验报告中交给老师）。

（三）撰写实验报告

实验报告既是实验工作的继续，又是实验工作的总结。将实验中得到的初步的、零散的感性的认识归纳整理、分析研究，从而得出科学的结论，这就是实验报告的主要任务。写实验报告应做到：字迹工整、叙述简练、逻辑性强、数据齐全、图表规范正确。其具体内容如下。

（1）填好封面各项内容（包括实验名称）。

（2）实验目的。

（3）画出实验电路图。

（4）实验内容及步骤。概括地、条理分明地写出实验内容及步骤。

（5）数据处理及结果表示。根据原始数据对实验结果进行计算、处理、分析归纳，得到

标准形式的结果表示（一般要画表格）、函数图像等。

（6）实验分析。一般是指进行实验方案比较、误差分析和提出改进建议等，或者根据实验报告要求的内容分析、归纳出相应的结论。

（7）实验设备。以表格形式写出设备的名称、型号、规格、编号等。

一份合格的实验报告，从内容上讲可能要比上述内容更详细。因此，写实验报告时，要结合具体的实验，按需要逐项写清楚，不必受上述规定的限制。

三、《学生实验守则》

（1）实验前必须认真预习实验内容及相关理论，明确实验目的、步骤、原理、初步了解实验所用仪器仪表的性能及使用方法，完成预习报告。实验时必须携带实验教材及预习报告。接受教师提问检查，预习不合格者，必须重新预习，否则不能做实验。

（2）必须按规定时间进行实验，因故不能做实验者，须向指导教师请假；所缺实验要在本课程考试之前补齐。迟到时间长者不得参加本次实验，应该进行补做。

（3）进入实验室后要保持安静，不得高声喧哗和打闹，不准吸烟，不准随地吐痰和吐口香糖，不准乱抛纸屑杂物，要保持实验室和实验台面及抽屉里的整洁。

（4）做实验时必须严格遵守实验室的规章制度和仪器设备的操作规程，按照教师或指导书的要求去做，以免发生意外事故损坏仪器设备甚至造成人身伤害。否则，学生要负相应责任。

（5）实验时要注意安全，若发现异常（出现冒烟或绝缘物烧焦气味等）应立即断开电源，防止事故扩大，并注意保护好现场，及时向指导教师报告。待指导教师查明原因，排除故障后，方可继续实验。

（6）要爱护仪器设备，使用前详细检查，使用后断掉所有仪表及设备的电源，发现丢失或损坏立即报告。不准将实验室的仪表、工具及器件等任何物品带出实验室。做实验要认真，实事求是，不得抄袭和编造实验数据。

（7）实验后要认真按指导书的要求完成实验报告，对不符合要求的实验报告应退回重做，并在教师规定的时间内将使实验报告（包括原始数据记录单）由课代表送交实验教师。

第一篇 误差分析与测量仪表简介

第一章 测量误差与数据处理

第一节 测量方法与误差

一、测量方法与最佳估计值

测量就是将被测量与选作标准的同类量相除得出倍数值（即测量值）的过程。其中，测量值应由数值和单位两部分组成。

进行测量时，必须考虑测量对象、测量方法和测量设备 3 方面的问题，要根据不同的被测量及对测量精确度的要求，来确定适当的测量方法，选用合适的测量设备。

测量设备分为两类。一类是度量器，它们是测量单位的分数或整数倍的复制实物。根据准确度的高低，电工测量的度量器可分为基准器、标准器和工作量具 3 类。我们把最精确地复现或保存单位的实物或装置称为基准器。它是国家处理测量事物的准绳和基础。标准器的准确度要低于基准器。工作量具是学校、工厂和科研单位的实验室中经常使用的度量器，如标准电池、标准电阻和标准电容等。另一类是测量仪器、仪表，准确度较工作量具低，是用某种方法进行测量的设备，被广泛应用于实验室和工程测试中。

（一）直接测量、间接测量与组合测量

这是根据获得测量结果的方式的不同而确定的分类方法。

1. 直接测量

可用仪器仪表直接读出测量值的测量称作直接测量，如用电压表测电压、电流表测电流等。直接测量分单次或多次直接测量。

单次直接测量的情况大致有 3 种：第一，仪器仪表精确度较低，多次读数相同，不必多次测量；第二，对测量的准确程度要求不高，只测一次就可达到测量目的；第三，因测量条件限制，不能多次测量（如某一时刻的线路电压）。

2. 间接测量

被测量是几个直接测量值的函数，要根据几个直接测量值来确定被测量，这种测量称作间接测量。如通过直接测量被测元件的电压 U 和电流 I ，可算出该元件的电阻值 $R=U/I$ 。

3. 组合测量

该方法是根据直接测量和间接测量的测量值，联立求解方程组，得出被测量。如要算出电阻线圈的温度系数 α 、 β ，根据以下公式只要测出在 t_1 、 t_2 温度下的电阻值 R_{t1} 、 R_{t2} ，联立求解即可算出 α 、 β

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

式中 t ——温度；

R_t —— $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值；

R_{20} —— 20°C 时的电阻值。

(二) 直读测量与比较测量

这是根据所用仪器仪表的不同而确定的分类方法。

1. 直读测量

它是指直接从测量指示仪表读出测量结果，是工程测量方法中应用最广泛的测量方法，其结果取决于仪器仪表的准确度，因而测量精确度并不高。

2. 比较测量

它是指在测量过程中，将被测量与标准量进行比较，而获得测量结果，如用电桥测量电阻。比较测量是高精确度的测量方法。

(三) 等精确度测量与不等精确度测量

测量条件完全相同（相同的观测者、相同的测量程序、相同地点、在相同的条件下使用相同的测量仪器、在短时期内）的重复测量，称作等精确度测量。

对同一物理量进行的测量条件不同（变化条件包括：观测者、测量方法、测量程序、测量仪器、使用条件、地点、时间）的多次测量，称作不等精确度测量。

(四) 真值与其最佳估计值

在一定条件下物理量符合其定义的真实值称为真值。无论多么精确的测量，都无法获得被测量的真值。不过，我们应尽量使测量值接近真值。最接近真值的测量值，称作真值的最佳估计值。最佳估计值的确定方法如下。

1. 直接测量中最佳估计值的确定

(1) 单次直接测量中，把被测量 x 的读数 x_s 当作其最佳估计值。

(2) 多次直接测量的最佳估计值。为了提高测量的可靠程度，常常对被测量 x 在等精确度下进行多次测量，得到的各次测量值为 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, m)$ ，则各次测量值的算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \quad (1-1)$$

最为接近真值， $m \rightarrow \infty$ 时， $\bar{x}$ 将无限接近真值。所以，把 $\bar{x}$ 作为多次直接测量的最佳估计值。

实际工作中以最佳估计值代替真值，单次测量值与最佳估计值之差为

$$\delta_i = x_i - \bar{x}$$

称 δ_i 为残差（或剩余误差）。

2. 间接测量中最佳估计值的确定

设间接测量量 N 是由相互独立的直接测量量 x 、 y 、 z 、 $\dots$ 的测量结果所决定的，其函数关系为

$$N = f(x, y, z, \dots) \quad (1-2)$$

用微分学可证明， N 的最佳估计值为

$$\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) \quad (1-3)$$

二、仪表误差、测量误差及其表示

任何仪表测量时，仪表的指示值与被测量的真值之间总有差异，这个差异称为仪表的

误差。

(一) 仪表误差

根据误差产生的原因, 仪表误差可分为两大类。

1. 基本误差

指仪表在规定的正常工作条件下 [即规定的环境温度 “ $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ” (见国标 GB776—1976) 或 “ $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ ” (见国标 GB7676—1998)、放置位置、频率及波形以及外电场磁场全无等。] 使用时, 由于结构和制造工艺上的不完善而产生的仪表本身所固有的误差。例如, 摩擦误差、刻度误差等均属于基本误差的范畴。

2. 附加误差

指仪表在非正常工作条件下 (指环境温度改变、使用方式错误、有外电场或磁场干扰等) 使用时所产生的额外误差。本教材所考虑的附加误差主要是由温度引起的附加误差, 即环境温度每偏离规定温度不超过 10°C 时, 要产生一个与基本误差相当的附加误差。如 A 组 1.5 级指示仪表的正常工作温度为 23°C , 温度偏离不超过 10°C , 所引起的附加误差用最大引用误差表示也是 $\pm 1.5\%$ 。

(二) 方法误差

测量误差有多种, 这里主要介绍须常考虑的方法误差。

从误差来源的角度看, 方法误差是由于测量方法不完善或测量所依据的理论不充分而引起的误差, 例如, 当用伏安法测电阻时, 因为电压表或电流表都有内阻, 所以测的电阻值中便含有方法误差。

(三) 仪表误差表示

仪表的误差大小通常有 3 种表达方式。

1. 绝对误差

指仪表的指示值 A_x 与被测量真值 A_0 之间的差值, 用符号 ΔA 表示。即

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

绝对误差有大小、符号和单位。因为真值是难以确定的, 实际工作中, 常把准确度等级高的标准表所测得的给出值称为实际值, 用 A 表示。绝对误差通常表示为

$$\Delta A = A_x - A \quad (1-5)$$

即绝对误差为仪表指示值与被测量的实际值的代数差值。

修正值与绝对误差数值大小相等, 但符号相反, 用 C 表示

$$C = -\Delta A = A - A_x \quad (1-6)$$

引进修正值后, 可以对仪表指示值进行修正, 以消除其误差, 提高测量精确度。

2. 相对误差

相对误差是指仪表的绝对误差与被测量的真值 A_0 之比的百分数, 用符号 γ_0 表示。即

$$\gamma_0 = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100\% \quad (1-7)$$

由于仪表指示值 A_x 与被测量真值 A_0 之间相差不大, 所以工程上常用指示值代替真值进行近似计算, 即

$$\gamma_x \approx \frac{\Delta A}{A_x} \times 100\% \quad (1-8)$$

绝对误差 ΔA 可由所用仪表的准确度等计算出来。由于相对误差可定量表示出仪表基本误差对测量结果的影响程度，所以工程上常用它来比较测量结果的准确度。

3. 引用误差

相对误差可以表示测量结果好坏，但不能全面评价指示仪表的质量（通常称准确度等级）。对一个指示仪表而言，标尺上各点的绝对误差相近似。但根据式（1-8）可知，指针在不同刻度上读数不同，因而各指示值的相对误差差别很大，无法用来评价仪表的质量。为此工程上采用引用误差来确定仪表的准确度等级。

绝对误差与基准值的比值的百分数，称为引用误差 γ_n 。对于不同类型标度尺的电测指示仪表，其基准值不同，引用误差如下。

（1）若是单向标度尺的仪表，基准值为量程，即仪表上量限 A_m ，则 γ_n 为

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

（2）若是双向标度尺的仪表，其基准值仍是量程，则 γ_n 为

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{|+A_m| + |-A_m|} \times 100\% \quad (1-10)$$

（3）若是无零位标度尺的仪表，基准值为上、下量限 A_{1m} 、 A_{2m} 的差值，则 γ_n 为

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{A_{1m} - A_{2m}} \times 100\% \quad (1-11)$$

（4）若标度尺是对数、双曲线或指数为 3 及 3 以上的仪表，或标度尺上量限为无穷大（如万用表欧姆档及绝缘电阻表）的仪表。基准值为标度尺工作部分长度 l_m ，绝对误差为 Δl ，则 γ_n 为

$$\gamma_n = \frac{\Delta l}{l_m} \times 100\% \quad (1-12)$$

第二节 仪表的准确度

仪表的准确度表征其测量值与真值的一致程度，也反映测量误差的大小。

一、电测指示仪表的准确度

仪表的准确度是用仪表的最大引用误差（即基本误差的极限）表示的。因为仪表各个刻度位置上的绝对误差有一些小差别，为了能用引用误差概括仪表的基本误差全貌，工程上就根据最大引用误差 $\gamma_{n,m}$ 来确定仪表的准确度，即根据最大绝对误差 ΔA_m 与测量上限值 A_m 的百分比来表示仪表的准确度。若有

$$\gamma_{n,m} = \frac{\Delta A_m}{A_m} \times 100\% \quad (1-13)$$

则就有仪表的准确度等级 $K \geq 100\gamma_{n,m}$ ，准确度等级 K 的分级国家标准有规定。 K 的数值越小，仪表准确度越高，则最大引用误差越小，基本误差也就越小。

仪表在规定的正常工作条件下使用时，不会有附加误差，这时的误差是由仪表本身的基本误差引起的。根据国标 GB7676—1998 的规定，电流表和电压表的准确度等级的分为 11 级（见表 1-1）。其他电测指示仪表的准确度等级的规定与此类似，详见国标 GB7676—1998。

表 1-1

电流表和电压表的基本误差

准确度等级	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0
基本误差	$\pm 0.05\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.3\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.0\%$
准确度等级	1.5	2.0	2.5	3.0	5.0	—
基本误差	$\pm 1.5\%$	$\pm 2.0\%$	$\pm 2.5\%$	$\pm 3.0\%$	$\pm 5.0\%$	—

【例 1-1】一电压表量程为 $U_m = 300\text{V}$ ，已知该表的最大绝对误差为 $\Delta U_m = \pm 2.86\text{V}$ ，试确定其准确度等级。

解 $\gamma_m = \Delta U_m / U_m \times 100\% = \pm 2.86 / 300 \times 100\% = \pm 0.95\%$

因等级按国标分为 11 级，所以该表的最大引用误差大于 0.5 级同量程的表而小于 1.0 级同量程的表 ($0.5 < 0.95 < 1.0$)，根据国标规定该表的准确度等级为 1.0 级。

通常，0.05、0.1、0.2 级仪表作标准表，用以检定准确度较低的仪表；0.5、1.0、1.5 级的仪表主要用于学校和工厂实验室的实验；准确度更低的仪表主要用于现场。

由于分度尺的标示不一致，即基准值的规定不同，引用误差的计算公式 [见式 (1-9) ~ 式 (1-12)] 不同，对应的在仪表盘面上准确度等级的标志符号也不同，参见表 1-1。

由仪表的准确度等级可算出该仪表允许的绝对误差（即最大绝对误差）。例如：1.5 级、上量限为 300V、单向标度尺的电压表，其允许绝对误差 $\Delta U_m = \pm (1.5\%) \times 300 = \pm 4.5\text{V}$ ；2.5 级、上量限、下量限同为 60MW 的双向标度尺功率表，其允许绝对误差 $\Delta P_m = \pm (2.5\%) \times (60 + 60) = \pm 3\text{MW}$ ；0.5 级、有效量程为 2~10A 的电磁系电流表，其允许绝对误差 $\Delta I_m = \pm (0.5\%) \times (10 - 2) = \pm 0.04\text{A}$ ；万用表欧姆档，准确度为 2.5 级，工作标度尺为 90mm，其用长度表示的允许绝对误差 $\Delta R_m = \pm (2.5\%) \times 90 = \pm 2.25(\text{mm})$ 。

二、数字表的准确度

数字表的准确度一般用绝对误差表示，通常有下列两种表示方法。

第一种表示法

$$\text{准确度} = \pm (a\%RDG + b\%FS) \quad (1-14)$$

式中 RDG ——仪表读数（即显示值）；

$\pm a\%$ ——相对误差，表示 A/D 转换器和功能转换器（如分压器、分流器、真有效值转换器）的综合误差；

FS ——仪表满度（量程）值；

$\pm b\%$ ——满度误差系数，是由于数字化处理带来的误差折合成满量程的百分数。

第二种表示法将数字化处理带来的误差用末位数字的变化量表示

$$\text{准确度} = \pm (a\%RDG + n \text{ 个字}) \quad (1-15)$$

$\pm n$ 个字——指最末一位显示数码有 $\pm n$ 个字的误差，为绝对误差，是数字化处理带来的误差用末位数字的变化量。

可见上述两式的第二项是完全相同的，所以两式是完全等价的。

数字表的准确度等级分为 0.0005、0.001、0.002、0.005、0.01、0.02、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0 这 11 个等级。

如 DT-860 型数字万用表，20V 直流电压档的准确度（即允许的绝对误差）为 $\pm (0.5\%RDG + 10\text{mA})$ 。

又如 DT-930 型数字万用表, 20mA 直流电流档的准确度为 $\pm (0.5\%RDG + 2mA)$ 。

由式 (1-14) 可得到测量值的相对误差为

$$\gamma_x = \pm \left(a\% + b\% \times \frac{FS}{RDG} \right) \quad (1-16)$$

式 (1-16) 说明, 数字表测量值的相对误差的第一项是不变的, 第二项是可变的。测量值等于量程时, 其测量误差最小, 随着测量值的减小, 相对误差逐渐增大。因此, 在使用数字表时, 应使选择量程略大于被测值 (或按测量要求选取), 以减小测量值的误差。

【例 1-2】 DT-860 型数字万用表, 200V 交流电压档的准确度 (即允许的绝对误差) 为 $\pm (1.0\%U_x + 5 \text{ 个字})$, 求测量值为 180V 时的误差; 若测量值为 10V, 仍使用 200V 档测量, 误差为多大?

解 DT-860 型数字万用表是 3 位半的, 200V 档显示电压值为 0~199.9V, 故末位 5 个字表示为 0.5V。被测量为 180V 时的允许绝对误差 (即最大绝对误差) 为

$$\Delta U_1 = \pm (1.0\% \times 180 + 0.5) = \pm 2.3(V)$$

示值相对误差为

$$\gamma_{U1} = (\pm 2.3/180) \times 100\% = \pm 1.28\%$$

当测量值为 10V 时, 允许绝对误差 (即最大绝对误差) 为

$$\Delta U_2 = \pm (1.0\% \times 10 + 0.5) = \pm 0.6(V)$$

示值相对误差为

$$\gamma_{U2} = (\pm 0.6/10) \times 100\% = \pm 6\%$$

由上述可看出, 准确度越高的仪表, 允许的基本误差越小, 但并不表示测量结果的准确度越高, 仪表量程大了会增大示值的相对误差。因而选择仪表既要考虑准确度, 又要考虑合适的量程。无论是测量指示仪表, 还是数字表, 通常应使被测量大于或等于仪表量程的 2/3。

仪表使用过程中, 测量机构的性能可能发生变化, 产生不允许的误差, 因此需定期对使用的仪表进行检定, 以确定仪表的误差、修正值和准确度。

第三节 测量误差的分类

在测量过程中, 测量结果与被测值之间总是存在偏差。为了尽量减小测量误差, 需要充分认识测量误差的规律性。根据误差的性质, 测量误差可分为三类, 下面逐一分析。

一、系统误差

在等精确度情况下, 多次测量同一量时, 误差的大小及符号均保持恒定或按一定规律变化, 这类误差称作系统误差。系统误差主要是由以下 3 方面原因产生的: 一是由于仪器、仪表本身的缺陷或不准确所造成的误差; 二是由于实验所依据的理论公式本身有近似性, 或是由于实验方法不完善所带来的误差; 三是由于操作者的操作水平、反应速度及生理和心理特点所造成的误差。

消除系统误差的关键取决于实验方法, 以及对实验数据分析的深入程度, 常用方法有以下几种。

1. 消除误差根源

对测量的过程和装置进行分析和研究,找出可能产生系统误差的因素,在测量前采取针对性措施,减弱或消除这些因素的影响。如用适当、精良的仪表,提高测量准确度;使用前细心调整;改善测量环境;提高实验人员技术水平等。

2. 对测量结果加以修正

根据经减小后剩下的系统误差,算出修正值,加到测量结果上;或者进行理论和实验分析,在计算公式中加入修正项;或者用较高一级的标准表校准一般仪表使测量结果得以修正。

3. 采用适当的测量方法

(1) 正负误差补偿法。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。如为了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,取前后两次测量结果的平均值,可消除外磁场带来的系统误差。

(2) 替代法。利用已知量代替被测量,如不改变仪表原来的读数状态,则认为被测量等于已知量。如用电桥测某一电阻 R_x ,调电桥平衡后,取下 R_x ,用一个标准电阻 R_s 代替 R_x ,也能使电桥平衡,则认为 $R_x=R_s$ 。这种方法测得的 R_x 与电桥准确度无关,即消除了电桥产生的系统误差。

其他还有差值法、零值法等。

综上所述,清除系统误差的原则是首先设法使它不产生系统误差,第二就是修正和减少,第三是设法在测量过程中消除。因此,我们在处理系统误差时,可将其分为两类来考虑,一类是绝对值和符号或变化规律已确定的称为已定系统误差;另一类是绝对值和符号或变化规律未确定的称为未定系统误差。处理数据时,应将已定系统误差从测量值中减去,得到修正后的最佳估计值。

二、随机误差

在等精确度条件下多次测量同一量时,大小和符号均可能发生变化的误差称随机误差。其值时大时小,符号时正时负,没有确定的变化规律。随机误差是由测量实验中许多独立因素的微小变化引起的(包括电源电压波动、外界干扰、温度的瞬间变化等)。

单次测量的随机误差没有规律,但测量次数足够大时,误差的总体服从统计规律的。对一个被测量进行的多次等精确度测量而得到的读数一般都服从正态分布,其随机误差也服从正态分布。故一般随机误差呈现下面4种特性。

- (1) 有界性,绝对值很大的误差出现的概率接近零。
- (2) 单峰性,绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。
- (3) 对称性,绝对值相同的正负误差出现的概率相同。
- (4) 抵偿性,将全部随机误差相加时,正负误差具有相互抵消的趋向。

抵偿性是随机误差的重要特性,凡具有抵偿性的误差,原则上都属于随机误差。因此,增加测量次数取其平均值是减小随机误差的办法。

三、粗大误差

凡是测量时的客观条件所不能解释的、突出的误差称作粗大误差。含有粗大误差的读数明显歪曲了测量结果。