



普通高等教育“十二五”规划教材

电工测量基础与 电路实验教程

颜湘武 主 编

赵书涛 冯文宏 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

电工测量基础与 电路实验教程

主 编 颜湘武
副主编 赵书涛 冯文宏
编 写 王新年 崔桂彦
主 审 柳 焯 梁贵书



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，是根据教育部工科电工课程教学指导委员会关于电路和电工技术课程的基本要求编写的。

全书分为3篇共9章，主要内容有测量和误差的基本概念、电工测量仪表、认识实验、电阻电路实验、动态电路实验、交流稳态电路实验、其他实验，以及电路仿真实验研究。

本书可作为高等院校工科类各专业的电路或电工技术基础实验本科教材，也可作为高职高专及函授教材，同时可供工程技术人员自学或参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工测量基础与电路实验教程/颜湘武主编. —北京：中国电力出版社，2011.5

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-1686-7

I. ①电… II. ①颜… III. ①电气测量-高等学校-教材②电路-实验-高等学校-教材 IV. ①TM93②TM13-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 088359 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011年6月第一版 2011年6月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 11印张 262千字

定价 18.50 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

电子电气基础课程教材编审委员会

主任委员	王志功	东南大学		
副主任委员	张晓林	北京航空航天大学	胡敏强	东南大学
	王泽忠	华北电力大学	戈宝军	哈尔滨理工大学
	马西奎	西安交通大学	刘新元	北京大学
	孟 桥	东南大学		
秘书长	李兆春	中国电力出版社		
委员	(按姓氏笔画排列)			
	于守谦	北京航空航天大学	公茂法	山东科技大学
	王 殊	华中科技大学	王万良	浙江工业大学
	王小海	浙江大学	王建华	西安交通大学
	王松林	西安电子科技大学	邓建国	西安交通大学
	付家才	黑龙江科技学院	刘润华	中国石油大学 (华东)
	刘耀年	东北电力大学	朱承高	上海交通大学
	宋建成	太原理工大学	张正平	贵州大学
	张彦斌	西安交通大学	李 承	华中科技大学
	李 青	中国计量学院	李 琳	华北电力大学
	李守成	北京交通大学	李国丽	合肥工业大学
	李哲英	北京联合大学	李晓明	太原理工大学
	李晶皎	东北大学	杨 平	上海电力学院
	陈后金	北京交通大学	陈庆伟	南京理工大学
	陈意军	湖南工程学院	陈新华	山东科技大学
	宗 伟	华北电力大学	范蟠果	西北工业大学
	段哲民	西北工业大学	段渝龙	贵州大学
	胡虔生	东南大学	赵旦峰	哈尔滨工程大学
	赵荣祥	浙江大学	唐庆玉	清华大学
	徐淑华	青岛大学	袁建生	清华大学
	郭陈江	西北工业大学	高会生	华北电力大学
	崔 翔	华北电力大学	梁贵书	华北电力大学
	曾孝平	重庆大学	曾建唐	北京石油化工学院
	韩 璞	华北电力大学	韩学军	东北电力大学
	雷银照	北京航空航天大学		



进入 21 世纪,“985 工程”和“211 工程”的实施,推动了高水平大学和重点学科的建设,在高校中汇聚了一大批高层次人才,产生了一批具有国际先进水平的学术和科学技术研究成果。然而高校规模的超高速增大,导致不少学校的专业设置、师资队伍、教材资源和教学实验条件不能迅速适应发展需要,教学质量问题日益突现。高校教材,作为教学改革成果和教学经验的结晶,其质量问题自然备受关注。

需要指出的是,很多高等学校教材经过多年的教学实践检验,已经成为广泛使用的精品教材。同时,我们也应该看到,现用的教材中有不少内容陈旧、未能反映当前科技发展的最新成果,不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要。这就要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进、开拓创新,在内容质量和出版质量上均有新的突破。

根据教育部高教司 2003 年 8 月 28 日发出的 [2003] 141 号文件,在教育部组织下,历经数年,2006~2010 年教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会按照教育部的要求,致力于制定专业规范或教学质量标准,组织师资培训、教学研讨和信息交流等工作,并且重视与出版社合作,编著、审核和推荐高水平电子电气基础课程教材。

“电工学”、“电路”、“信号系统”、“电子线路”、“电磁场”、“自动控制原理”、“电机学”等电子电气基础课程是许多理工院校的先修课程,也是电子科学与技术、电气工程及其自动化等专业学科的基石,在科学研究领域和产业应用中发挥着极其重要的作用。此类教材的编写,应提倡新颖的立意,“适用、先进”的编写原则和“通俗、精炼”的编写风格,以百花齐放的形式和较高的编写质量来满足不同学科、不同层次的师生的教学要求。

本电子电气基础课程教材编审委员会即是基于此目的而设立的,希望能够鼓励更多的优秀教师参与其中,为高质量教材的编写和出版贡献出聪明才智和知识经验。

2009 年 10 月于东南大学

前 言

本书是根据教育部工科电工课程教学指导委员会对电路和电工技术课程的基本要求,结合多年的教学和实验指导经验,在吸取已有实验指导书优点的基础上编写而成。

本书强调电工测量仪表工作原理、数据处理以及误差分析基本方法的熟练掌握,注重实验内容模块化,以提高学生的实验设计能力和理论知识的应用能力为原则,采用通用的电路仿真软件,将电路实践与后续课程实践以及工程实际应用融入同一平台,简单易学、连贯性好,有利于学生实验技能的培养和提高。

全书分为3篇共9章。其中:第一篇由第一、二章组成,主要涉及电工测量的基本方法、实验数据处理和误差分析,以及常用电工测量仪表的工作原理;第二篇由第三~八章组成,涵盖了基本实验以及综合设计性实验,主要包括认识实验、直流电阻电路实验、暂态电路实验、交流稳态电路实验以及拓展实验等模块,着力培养学生的动手操作能力、实验设计能力及知识应用能力;第三篇由第九章组成,主要包括通用仿真软件的使用(包括附录F)、电路仿真实验研究等内容,采用通用的电路仿真平台,注重学生分析问题和解决问题能力的提高。

本书第一篇由赵书涛负责编写,第二篇和概述由冯文宏负责编写,附录A~E由崔桂彦负责编写,第三篇和附录F的编写以及全书的校核与定稿工作由颜湘武负责,王新年参与了本书编写和校核的部分工作。

同时华北电力大学电工实验中心主任、其他教师和实验人员对本书的编写给予了大力支持和帮助,并提出了宝贵的意见和建议。在此,向他们表示诚挚的谢意。

在本书的编写过程中,哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院柳焯教授、华北电力大学电气与电子工程学院梁贵书教授认真细致地审阅了全部书稿,并提出了许多宝贵的修改意见,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2011年3月于华北电力大学

目 录

序	
前言	
概述 走进实验室	1

第一篇 电工测量技术基础

第一章 测量和误差的基本概念	4
第一节 测量的基础知识	4
第二节 测量误差	7
第三节 测量结果的数据处理	10
第四节 实验结果的计算机处理及绘图	13
第二章 电工测量仪表	23
第一节 直读电工测量仪表的一般知识	23
第二节 直读电工测量仪表组成及工作原理	25
第三节 比较式仪表	37
第四节 数字测量和电子测量仪器	41

第二篇 电 路 实 验

第三章 认识实验	48
第一节 简单直流电路及元件伏安特性测试	48
第二节 示波器和信号发生器的使用	50
第三节 单相交流电路的认识	51
第四章 电阻电路实验	53
第一节 基尔霍夫定律和叠加定理的验证	53
第二节 戴维南定理/诺顿定理	56
第三节 电阻电路的实验研究(研究性实验)	60
第五章 动态电路实验	62
第一节 一阶电路阶跃激励下的动态响应	62
第二节 二阶电路阶跃激励下的动态响应	65
第六章 交流稳态电路实验(一)	68
第一节 交流电路及其等效参数的测量(综合性实验)	68
第二节 改善功率因数的实验	72
第三节 互感电路实验(研究性实验)	75

第四节	三相交流电路（综合性实验）	78
第七章	交流稳态电路实验（二）	83
第一节	交流电路频率特性的研究（综合性实验）	83
第二节	非正弦周期信号的研究（综合性实验）	88
第八章	其他实验	91
第一节	双口网络传输参数的测试（设计研究性实验）	91
第二节	负阻抗变换器	94
第三节	回转器	96
第四节	受控源的实验研究	99
第五节	非线性电路中混沌现象的实验研究	103

第三篇 电路实验的计算机仿真

第九章	电路仿真实验研究	107
第一节	直流电路仿真分析	107
第二节	暂态电路仿真分析	109
第三节	交流电路频率特性仿真分析	118
第四节	交流谐振电路频率特性仿真分析	123
第五节	混沌现象的仿真研究	127
附录 A	SS-7802A 型示波器使用说明	136
附录 B	TFG2000 系列 DDS 函数信号发生器使用说明	140
附录 C	SL2302 型直流稳压/恒流电源使用说明	143
附录 D	DGX-1 型电工技术实验装置简介	144
附录 E	DG03 型多功能全数控制智能函数信号发生器使用说明	149
附录 F	电路仿真软件（PSpice）的使用说明	150
参考文献		165

概述 走进实验室

曾有位 IT 行业的成功人士说过：“听过的会忘记，见过的会记住，做过的才会真正懂得。”这句话可为工科课程学习的经验之谈。

电工实验是实践理论知识、培养实验技能、提高理论认识水平的重要环节，也是将来从事电气工程科技工作的基础。

完成一个实验任务大致有如下过程。

(1) 实验前预习，明确实验任务和安全注意事项，设计实验方案，制定实验步骤或技术路线。

(2) 实验中细致操作，分析并解决实验中所遇到的问题，严谨地记录实验数据和结果。

(3) 实验后仔细分析、总结实验规律，认真撰写实验报告。

上述每一步都是完成一个实验任务的重要环节，缺一不可。

一、实验前预习和实验技能

通过严谨的科学实验和动手实践，实验探究理论原理及科学规律，可以培养求真务实的科学作风，锻炼理论联系实际的知识运用能力，还能培养过硬的实践技能。

1. 实验前的预习

实验前应进行预习（看教材相关内容、查实验指导书、利用网络教学系统及课件），以了解本次实验的实验项目、主要内容，通过实验应达到加强哪一方面的知识理解。预习后可列写简单的预习报告或实验提纲，以利于实验的进行。

2. 实验操作和技能培养

(1) 团队协作。

1) 同组人员应合理分工、协调配合、沟通交流。

2) 进行重要操作时，应预先告知同组人。

(2) 接线。

1) 合理安排仪表组件位置，接线要牢固可靠、长短适宜、布线合理、易于检查、方便操作。

2) 导线色别的选择要规范。直流实验中选择红（或黄/绿）、黑（或蓝）分别接正、负极。交流实验须用“黄、绿、红”三色导线依序连接 A、B、C 三个相线，黑（或蓝）色导线接零线。

3) 先接主回路，再接并联电路（如电压表等）。

4) 连线较多时，需注意一个接线柱上不得接过多导线。

5) 实验中应随时监视，实验值不能大于所用仪器及变阻器等电气设备的电压、电流、功率等安全定值。

6) 实验完毕应断开电源再拆线。

(3) 实验过程。

1) 实验操作要做到心中有数、胆大心细、严谨求实、规范操作。

2) 基本实验项目和内容完成后如果还有时间,可以重复练习接线和操作,或者进行其他选做实验。

(4) 测量数据的选择和使用。

1) 每项实验应记明实验项目、所用主要仪表及编号、实验条件及测量数据等,以求得到完整、精炼、可靠的原始数据。

2) 如实记录实验过程和数据,培养严谨求实的科学作风。

3) 了解被测曲线趋势和特殊点,曲率大处测点可较密集,所取点数应合理,使曲线能真实反映客观情况。绘制曲线时应配合实验结果的有效数字,选择合适的比例尺,避免夸大或淹没实验误差。

3. 实验中应培养的工程素养

(1) 实验课程是理工科学生接触实践的基本环节,通过实验预习、操作、测量、记录、整理、分析等,培养严谨求实、善于分析和总结归纳的工程技能和素养。

(2) 教师在指导实验的过程中,也应注意引导学生建立和培养工程概念。

(3) 实验过程中,尽量避免使用口语化的语言,而应使用规范的术语。

(4) 教师在发现问题或遇学生提出问题时,可不直接告诉其问题所在,而是引导学生自己找出出现问题的原因和解决办法。比如在实验中出现接线错误或不合理等问题时,可以引导学生自行检查并解决,而不是直接帮助其纠正。

二、实验室守则

(1) 实验时应保证人身、设备安全,爱护实验室设备,遵守实验室的规定。

(2) 使用本组的实验设备和器材,未经教师许可不得随意动用其他实验台的物品。

(3) 学生按实验台号分组后应保持稳定,不得擅自换组。

(4) 鼓励在基本实验项目完成且时间允许的情况下增加实验内容,但须征得指导教师的同意。

(5) 不论任何原因造成设备损坏,须向指导教师如实报告,不得隐瞒或自行更换。

(6) 不在实验室吃零食,交流沟通时不大声喧哗。

(7) 实验过程中不乱扔杂物,保持实验室、实验台的整洁。

三、实验报告要求

1. 实验报告内容

(1) 实验名称、实验目的、实验电路或接线图。

(2) 实验仪器设备的名称、型号和数量。

(3) 原始数据记录。

(4) 实验数据的整理及计算、绘制的实验曲线。

(5) 实验中出现的問題及解决办法。

(6) 实验误差分析。

(7) 实验结论、思考及体会等。

2. 实验报告的撰写

(1) 实验前所使用的仪表设备,实验过程中的电路图、元件参数,与实验数据一并在原始记录中予以记载。

(2) 原始记录中应包括同组实验人、实验时间等信息。

(3) 简要列写与实际实验直接相关的实验目的、实验原理（必要时），应特别注意不要完全照抄实验教材或实验指导书，不要列写与所做实验无关的内容。

(4) 简述实验内容和实验过程，整理实验数据。

(5) 处理实验数据、绘制图形和曲线。

(6) 结合理论计算，进行误差分析，得出实验结果。

第一篇 电工测量技术基础

第一章 测量和误差的基本概念

第一节 测量的基础知识

一、测量的概念

1. 测量的定义

测量是通过物理方法对自然界中客观事物定量表征的过程,是用实验方法把被测量与标准量进行比较的操作。其本质是对被测物理量进行“取样”,并定量“读出”测量结果,可以表示为

$$\text{测量结果} = \frac{\text{被测参数量值}}{\text{单位标准量}}$$

即

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

测量方法、测量标准和测量手段是测量中不可缺少的三个要素。

2. 准确度

准确度是指测量得到的结果与被测对象的真实值接近的程度。

3. 精密度

精密度是指多次重复测定同一量时,各测定值之间彼此接近的程度,它是表征测量过程中随机误差大小的指标。精密度高表明测定中随机误差小,但不能保证系统误差也小,故精密度高不一定准确度高。精密度也可以简称为精度,描述测量数据的分散程度。

4. 灵敏度

在仪表输入的被测量始终小于仪表输出满标值的条件下,仪表输出信号的变化量 $\Delta\alpha$ 与输入信号的变化量 Δx 之比称为仪表的灵敏度,用 S 表示,即

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x} \quad (1-2)$$

仪表灵敏度等于单位被测量变化引起的仪表输出量变化,该变化可以用满标值的百分数表示。例如,以指针满偏电流 I_g 的大小表征电表的灵敏度,满偏电流愈小灵敏度愈高,表头满偏电流一般为十几毫安到几百毫安。

二、测量方法分类

测量方法直接关系到测量工作能否正常进行以及测量结果的有效性,一般根据测量结果和被测量性质对测量方法进行分类。

1. 根据测量结果分类

(1) 直接测量。从仪表的指示机构直接获取被测量大小的测量方法,称为直接测量。例如,用电流表测量支路电流、用电阻表测量电阻等。

(2) 间接测量。先对与被测量有关的物理量进行直接测量,然后根据它们之间的函数

关系通过计算求出被测量大小的测量方法,称为间接测量。例如,通过测量无源二端电阻网络两端的电压和通过电阻的电流,根据欧姆定律,即

$$R = \frac{U}{I} \quad (1-3)$$

可以计算出被测二端网络的等效电阻值。

显然,间接测量要比直接测量复杂,一般情况下,应尽量采用直接测量;只有在不能进行直接测量的场合或不具备直接测量条件的情况下才选择间接测量。

(3) 组合测量。在测量过程中,需要改变测量条件进行多次测量,根据直接测量和间接测量的结果,解联立方程组求出被测量的测量方法,称为组合测量。例如,测量电阻 R 的温度系数 α 和 β ,根据电阻在温度 t 时阻值与温度系数的关系,分别测量 R 在温度 t_1 和 t_2 状态下的电阻值 R_{t1} 和 R_{t2} ,然后解方程组

$$\begin{cases} R_{t1} = R_{20}[1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2] \\ R_{t2} = R_{20}[1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2] \end{cases} \quad (1-4)$$

可以求出电阻的温度系数 α 和 β 。

测量方法的选择与仪表的选择同等重要,即使在同一种类的测量方法中仍有很多具体的测量方法。在实际测量时,应根据具体情况选择合适的测量方法。

2. 按被测量性质分类

(1) 时域测量。时域测量主要是测量被测量随时间变化的规律,被测量是时间的函数,如交流电压、电流等。它们的稳态值和有效值多用仪表直接测量,而它们的瞬时值可以用示波器测量,同时观察波形,可获得其随时间变化的规律。

(2) 频域测量。频域测量主要是测量被测量的频率特性和相位特性,被测量是频率的函数,如测电路的幅频特性、相频特性等。

(3) 数字域测量。复杂数字电路和系统的响应不再是简单的线性关系,时域和频域测量无法达到要求。数字域测量主要是指对数字电路和系统的数字逻辑量进行测量。例如用逻辑分析仪对数字量或电路的逻辑状态进行测量,同时观察多条数据通道上的逻辑状态,或者显示某条数据线上的时序波形。

(4) 随机测量。随机测量主要是指对各种噪声、干扰信号等随机量的测量。

此外,测量方法还可以分为静态测量和动态测量;根据使用的仪表类别不同,又可分为直读测量和比较测量。

对于同一事物可能有多种不同的测量方法。测量方法与测量仪表选择的正确与否,直接关系到测量结果的可信赖程度,也关系到测量工作的经济性和可行性。不恰当的和错误的测量方法,除了得不到正确的测量结果外,甚至还会损坏测量仪器和被测设备。准确度高的测量仪器设备不一定就能获得准确的测量结果,只有根据不同的测量对象、测量要求和测量条件来选择正确的测量方法,构成合理的测量系统,同时进行细心的操作,才能得到正确的测量结果。

三、电工测量及测量设备

1. 电工测量

电工测量是将被测量的电学量或磁学量与作为测量单位的同类电学量或磁学量进行比较,以确定被测电学量或磁学量的大小的操作。电工测量的范围包括电流、电压、功率、频

率、相位等电学量和电阻、电容、电感等电参数的测量，以及经相应变换器把某些非电量（温度、湿度、压力、速度）等转换为电学量后的测量（即非电量电测法）。

测量过程中，被测参数的量值和单位标准量进行比较，所得的数值配以单位构成对测量的完整表述。

2. 测量单位

把测量中的标准量定义为“单位”。为了对同一量在不同时间、空间进行测量时得到相同的结果，必须采用统一的而且固定不变的单位。单位制就是在这—要求下建立起来的。

单位制主要有“公制”和“英制”两种，目前普遍采用的由国际计量大会（CGPM）所推荐的一种一贯单位制，即是国际单位制（SI），俗称“公制”。SI 的七个基本单位是 m、kg、s、A、K、mol 和 cd，它们表示的量的名称、单位名称和符号见表 1-1 所列。

表 1-1 国际单位制基本单位

量	单位名称		符号
长度	米	metre	m
质量	千克	kilogram	kg
时间	秒	second	s
电流	安 [培]	ampere	A
热力学温度	开 [尔文]	kelvin	K
物质的量	摩 [尔]	mole	mol
发光强度	坎 [德拉]	candela	cd

SI 导出单位是用 SI 基本单位以代数形式表示的单位。SI 导出单位由两部分组成，一部分是包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位，另一部分是组合形式的 SI 导出单位。表 1-2 列出了部分具有专门名称的 SI 导出单位。

表 1-2 国际单位制中具有专门名称的部分导出单位

量	单位名称	符号	量	单位名称	符号
电压、电位、电动势	伏 [特]	V	磁通 [量]	韦 [伯]	Wb
功率	瓦 [特]	W	力、重力	牛 [顿]	N
电荷、电量	库 [仑]	C	压力、压强、应力	帕 [斯卡]	Pa
电阻	欧 [姆]	Ω	光通	流明	lm
电感	亨 [利]	H	光照度	勒 [克斯]	lx
电容	法 [拉]	F	摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$
电导	西 [门子]	S	能、功、热量	焦 [耳]	J
频率	赫 [兹]	Hz	吸收剂量	戈 [瑞]	Gy
磁感应强度	特 [斯拉]	T	剂量当量	希沃特	Sv

在电工测量中，量值的单位一般采用国际单位制，采用非国际单位时必须按照国家标准执行。

3. 度量器和测量仪器

度量器是测量单位的复制实体，也称为量具。根据准确度的高低，度量器分为基准器

(基准量具)、标准器(标准量具)和工作量具。

基准器是现代科学技术水平所能达到的最高准确度的度量器,由国际和各国最高计量部门保存,分为主要基准器、副基准器、比较基准器和工作基准器。在电磁学计量中,主要的基准器有电压基准器、电阻基准器和计算电容基准器。

标准器的准确度低于基准器,供地方计量部门和科研单位、高等院校、工厂的计量部门保存,对工作量具进行检定或标定时使用。

工作量具的准确度低于标准器,用于科研、生产、实验及工程测量。

在电工实验中,常使用的度量器有标准电池、标准电阻、标准电容及标准电感等。

(1) 标准电池。标准电池是保存和传递直流电动势单位伏特的标准量具。标准电池的电动势一般在 $1.0185 \sim 1.0195\text{V}$ 之间。标准电池是一种化学电池,由硫酸镉溶液和电极构成。标准电池主要用于电压的比较,不能用作电源供电。

(2) 标准电阻。标准电阻是保存和传递电阻单位欧姆的标准量具,对标准电阻的要求是准确度高、稳定性好、可靠性强。标准电阻一般由锰铜材料制成,如用锰铜丝绕制而成。锰铜具有很高的电阻率和很低的温度系数,并且热电动势也很小。通过适当的工艺处理,采用特殊的绕制方法(如交流标准电阻双线并绕和交叉并绕的方法),可以制成比较理想的标准电阻。

变值标准电阻(可变电阻箱)由若干个定值标准电阻串联构成,分成 $\times 1000$ 、 $\times 100$ 、 $\times 10$ 、 $\times 1$ 、 $\times 0.1$ 等多挡结构,各挡按十进制进位,利用转换开关实现对总电阻的调节,由于转换开关挡中存在接触电阻,因此,变值标准电阻的准确度低于定值标准电阻。

(3) 标准电容。标准电容是保存和传递电容单位法拉的标准量具,对标准电容的要求是准确度高、稳定性好、线性度好、损耗因数小。

(4) 标准电感。标准电感是保存和传递电感单位亨利的标准量具,标准电感包括标准自感和标准互感。对标准电感的要求是准确度高、稳定性好、线性度好、品质因数高。

第二节 测量误差

由于仪表的不准确、工作条件的不同、测量方法的缺陷等各种因素,都会使测量结果产生误差,在测量过程中,应尽量消除或减小这些误差,使测量结果尽可能与实际值接近,但同时也应考虑测量的经济性、可靠性、复杂性等因素。

一、误差的分类

按照误差的性质分类,测量误差可分为系统误差、偶然误差和疏失误差。

1. 系统误差(规律误差)

在一定的测量条件下,误差的大小和符号保持恒定或按照某种已知的函数规律变化,这种误差称为系统误差。

(1) 产生系统误差的原因。

- 1) 仪表本身不完善,如刻度不准确、本身功耗的影响等。
- 2) 测量方法不当,如接线不合理、理论依据不严密等。
- 3) 使用不当,如仪表放置方向不正确、未经调零等。
- 4) 行为的影响,如视觉缺陷、读数时人体位置不当等。

5) 环境条件的影响, 如温度、湿度的改变, 电场、磁场的干扰等。

系统误差是客观存在的, 但有一定规律, 在电工测量中可以采取必要的措施, 将其消除或减小。

(2) 系统误差的表示。

1) 绝对误差。被测量的测量值 X 与实际值 A 之差称为绝对误差, 用 Δ 表示, 即

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

可见, 绝对误差是有单位的数值, 而且可正可负, 它的大小和符号分别表示了测量值偏离实际值的程度和方向, 它不能表示测量结果的准确度。

2) 相对误差。绝对误差与实际值之比的百分数称为相对误差, 用 γ 表示, 即

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

相对误差表示了测量值与实际值的偏差在实际值中所占的比例, 显然, 它可以表示测量结果的准确度。

2. 偶然误差 (随机误差)

在一定的测量条件下, 多次测量同一个量, 误差的大小和符号不定, 不存在已知的变化规律, 也不可预知, 这种误差称为偶然误差。产生偶然误差的原因主要是电源电压或频率无规则波动和环境条件的瞬态变化。

偶然误差只有在多次重复测量时才会发现, 系统误差表示必然性, 偶然误差表示可能性。当在同一测量条件下, 对某一被测量进行多次测量时, 系统误差的规律不变, 偶然误差出现的概率密度呈正态分布, 可采用概率统计的方法处理。

实验中常采用对被测量进行多次重复测量取其算术平均值作为测量结果的最佳值, 以消除可能存在的偶然误差, 即有

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (1-7)$$

式中: a_i 为第 i 次测量值; A 为测量结果。

一系列直接测量值与测量结果 A 的差值称为剩余误差或残余误差, 简称残差, 即

$$d_i = a_i - A \quad (1-8)$$

偶然误差一般用精密度表示。精密度用剩余误差计算, 有以下三种表示方法。

(1) 均方根误差 (标准偏差)。

一系列测量结果的均方根误差定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 也叫贝塞尔公式。均方根误差表示对同一被测量进行多次测量所得结果的分散性, 也称为测量列中单次测量的标准偏差。均方根误差大, 表明误差取值范围宽、分散程度大、测量结果的精密度低; 均方根误差小, 则表明测量结果的精密度高。标准偏差在正式的误差分析和计算中, 常作为偶然误差大小的量度。被测物理量的结果可表示为 $A \pm \sigma$ 。

当对同一被测量进行多次测量时, 测量列算术平均值的标准偏差为

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

(2) 或然误差。或然误差是从剩余误差中找出一个数值,使剩余误差中比该数值大的和比该数值小的数出现的机会相等。当 $n \rightarrow \infty$ 时,或然误差为

$$\varepsilon = 0.6785\sigma \approx \frac{2}{3}\sigma$$

(3) 算术平均误差。一系列测量结果的算术平均误差定义为

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{\sqrt{n(n-1)}} \quad (1-10)$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\alpha = 0.7979\sigma \approx \frac{4}{5}\sigma$ 。

3. 疏失误差 (粗大误差)

测量结果与实际值明显不符所对应的误差称为疏失误差。产生这种误差的原因主要是读错数或记错数、计算错误、仪表出现故障等。处理疏失误差时,可将其对应的测量值一律删去。

二、误差的估计

1. 直接测量中误差的估计

在直接测量中,由仪表产生的最大相对误差为

$$\gamma = \frac{\pm K\% \times A_m}{A} \quad (1-11)$$

式中: K 是仪表的准确度等级; A_m 是仪表的量程; A 是被测量的实际值。

在不知道 A 的情况下,可以取被测量多次测量值的平均值代替 A 。

2. 间接测量中误差的合成与估计

根据被测量和各直接测量物理量之间的函数关系,可以估计间接测量中的误差。

(1) 加法关系。设 $y = x_1 + x_2 + \cdots + x_n$, x_i 的绝对误差为 Δx_i , $i = 1, 2, \cdots, n$ 。当 Δx_i 为已知时, y 的相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \cdots + \Delta x_n}{y} \quad (1-12)$$

各单项相对误差为

$$\gamma_1 = \frac{\Delta x_1}{x_1}; \gamma_2 = \frac{\Delta x_2}{x_2}; \cdots; \gamma_n = \frac{\Delta x_n}{x_n}$$

事实上,一般情况并不知道 Δx_i 具体的大小,只知道一个范围。据此可对其绝对误差做粗略估计,得出其绝对值的粗略估计值 $|\Delta \tilde{x}_i|$ 。此后,可按最坏的情况考虑,即 Δx_i 均为正或均为负,则估计最大可能的相对误差为

$$\gamma = \frac{\pm (|\Delta \tilde{x}_1| + |\Delta \tilde{x}_2| + \cdots + |\Delta \tilde{x}_n|)}{y} \quad (1-13)$$

当单项项数较少时,这种可能性较大,采用该方法比较合适;当单项项数较多时,这种可能性很小,不宜采用式 (1-13) 所述方法,一般采用几何合成法进行估计,即

$$\gamma = \frac{\pm \sqrt{(\Delta \tilde{x}_1)^2 + (\Delta \tilde{x}_2)^2 + \cdots + (\Delta \tilde{x}_n)^2}}{y} \quad (1-14)$$