

XINSHIJI DIANGONG DIANZI SHIJIAN XILIE GUIHUA JIAOCAI

新世纪电工电子实践系列规划教材



电路实验与实训教程

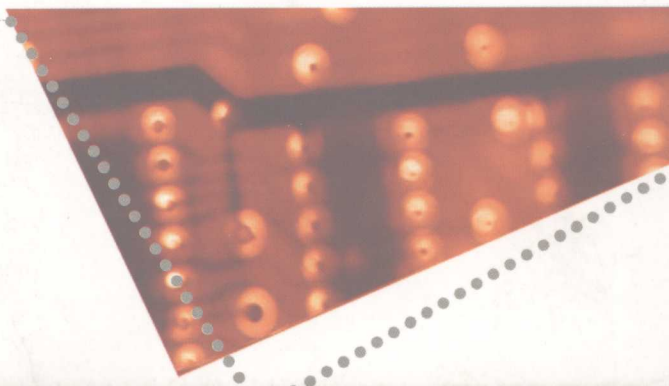
DIANLU SHIYAN

YU SHIXUN JIAOCHENG

主编 / 张彩荣 副主编 / 崔 霞 闫俊荣

主审 / 胡福年

东南大学出版社



新世纪电工电子实践系列规划教材

电路实验与实训教程

主 编 张彩荣

副主编 崔 霞 闫俊荣

主 审 胡福年

东南大学出版社

· 南 京 ·

内 容 提 要

根据教育部 1995 年颁发的高等工业学校《电路课程教学基本要求》及《电工技术(电工学 I)课程教学基本要求》,结合当前企业用人单位对新型人才需求的要求及创新教育的需要,编写了这本实践性教材。

本书的内容分为 3 章,第 1 章为电路实验与实训基础篇,主要讲述测量及误差分析、实验实训的基本要求、常用电工仪器仪表介绍、常用电路元器件介绍;第 2 章为电路实验与实训篇,本部分首先介绍 DGX-1 型实验装置的结构,然后重点讲述 20 个基础实验的原理及实验内容、9 个设计性实验及电路实训内容;第 3 章为计算机辅助分析与设计篇,主要介绍 Multisim 9 的软件及仿真分析方法,并给出了 8 个仿真实验的过程及结果。

本书适合普通高等学校电类专业、机械类专业及计算机类专业师生使用,也可供科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路实验与实训教程/张彩荣主编. —南京:东南大学出版社,2008.10

(新世纪电工电子实践系列规划教材)

ISBN 978-7-5641-1403-9

I. 电… II. 张… III. 电路—高等学校—教材
IV. TM13-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 155250 号

电路实验与实训教程

出版发行	东南大学出版社
出 版 人	江 汉
网 址	http://press.seu.edu.cn
电子邮箱	press@seu.edu.cn
社 址	南京市四牌楼 2 号
邮 编	210096
经 销	全国新华书店
排 版	南京理工大学印刷厂
印 刷	南京京新印刷厂
开 本	787mm×1092mm 1/16
印 张	16
字 数	399 千
版 次	2008 年 10 月第 1 版
印 次	2008 年 10 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5641-1403-9/TM·13
印 数	1—4000 册
定 价	32.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与读者服务部联系。电话(传真):025-83792328

前言

注重创新精神和实践能力是培养高素质人才的关键环节,而且在创新和实践能力二者之中,实践能力是基础和根本。这是由于创新基于实践、源于实践,实践出真知,实践检验真理,实践活动是创新的源泉,也是人才成长的必由之路,抓住实践能力的培养等于抓住了人才培养的龙头和根本。加强实践能力的培养这个任务历史地落在了高等学校工科专业身上。

电路课程是电类专业最早的一门专业基础课,它的实践内容和效果对后面的专业基础课和专业课具有深远的影响。本书作者根据教育部 1995 年颁发的高等工业学校《电路课程教学基本要求》及《电工技术(电工学 I)课程教学基本要求》,结合当前企业用人单位对新型人才需求的要求及创新教育需要,依托天煌教仪生产的 DGX-I 型实验装置编写了这本实践性教材。

为了提高教学质量,满足学生多层次的要求,本书在内容上做了较充分的准备,全书共分 3 章。第 1 章讲解电路实验与实训基础,包括测量方法及误差分析、实验实训的基本要求、常用电工仪器使用介绍、常用电路元器件认识。第 2 章讲解基础实验及设计性实验、电路实训内容。首先介绍了 DGX-I 型实验装置的结构及使用方法,然后详细讲解了 20 个基础实验的内容及实验方法,学习了 9 个设计性实验的设计要求及设计方法,最后通过电路实训内容介绍了焊接电路、安全用电、组装万用表、安装日光灯等项目。第 3 章讲解用 Multisim 9 进行计算机仿真的过程,并给出了 8 个用常规电路实验方法较难进行实验的仿真实验的过程及结果。

通过本书教学内容,学生可以掌握如下技能:

- (1) 认识常用电子元器件。能用仪器仪表测试其参数或直接读出其参数。
- (2) 熟练使用常用电子仪器,包括电压表、电流表、万用表、功率表、直流稳压电源、函数信号发生器、示波器等。
- (3) 对所学理论知识能用实验方法进行验证,并能自行设计和连接电路,科学合理地安排实验步骤。
- (4) 根据所学理论知识及实践经验,能排除实验中出现的故障,具有一定的

分析问题和解决问题的能力。

(5) 对实验数据能进行处理和分析。

(6) 具有使用计算机辅助分析工具分析电路的能力。

(7) 具有解决日常生活中常见的电路安装、供电故障问题的能力。

本书由徐州师范大学张彩荣任主编并编写了第 2.2 节,徐州师范大学崔霞任副主编并编写了第 1 章及第 2.1 节、第 2.4 节,徐州师范大学闫俊荣任副主编并编写了第 3 章及第 2.3 节。在本书的编写过程中,许多同行给予了热情的帮助、指导、关心,提出了宝贵的意见,在此致以诚挚的谢意!

由于编者水平有限,本书一定有缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

编者

2008 年 6 月

目 录

1 电路实验与实训基础	(1)
1.1 测量和误差分析	(1)
1.1.1 概述	(1)
1.1.2 误差分析	(3)
1.1.3 实验与实训的基本要求	(13)
1.1.4 常见故障的检查	(21)
1.2 常用仪器仪表	(25)
1.2.1 概述	(25)
1.2.2 万用表	(31)
1.2.3 电压表	(40)
1.2.4 毫伏表	(45)
1.2.5 电流表	(47)
1.2.6 功率表	(49)
1.2.7 直流稳压电源	(54)
1.2.8 信号发生器	(55)
1.2.9 示波器	(58)
1.2.10 测电笔的结构和使用	(64)
1.2.11 单相调压器	(65)
1.3 常用元器件	(66)
1.3.1 电子元器件的发展现状	(66)
1.3.2 电阻器	(67)
1.3.3 电位器(可变电阻器)	(72)
1.3.4 电容器	(75)
1.3.5 电感器	(80)
1.3.6 半导体二极管	(84)
1.3.7 运算放大器	(86)
2 电路实验与实训	(89)
2.1 DGX-1 型电工技术实验装置	(89)
2.1.1 概述	(89)
2.1.2 DG01 电源控制屏	(90)

2.1.3 有源挂件	(91)
2.1.4 无源挂件	(92)
2.1.5 安全和维护	(98)
2.2 基础实验	(98)
2.2.1 电路元件的伏安特性测试	(98)
2.2.2 基尔霍夫定律和叠加原理的验证	(102)
2.2.3 特勒根定理和互易定理的验证	(106)
2.2.4 电压源和电流源的等效变换	(111)
2.2.5 线性含源二端网络和等效电源定理	(115)
2.2.6 受控源 VCVS、VCCS、CCVS、CCCS 的实验研究	(119)
2.2.7 典型电信号的观察和测量	(124)
2.2.8 一阶电路的研究	(126)
2.2.9 R、L、C 元件阻抗特性的测定	(129)
2.2.10 用三表法测量电路等效参数	(131)
2.2.11 正弦稳态交流电路相量的研究	(135)
2.2.12 RLC 串联谐振电路的研究	(138)
2.2.13 互感电路的测量	(140)
2.2.14 变压器的连接和测试	(143)
2.2.15 三相交流电路电压和电流的测量	(147)
2.2.16 三相功率的测量	(150)
2.2.17 功率因数和相序的测量	(154)
2.2.18 二端口网络设计和参数测试	(156)
2.2.19 负阻抗变换器及其应用	(159)
2.2.20 回转器及其应用	(163)
2.3 设计性实验	(166)
2.3.1 电路电位的研究	(166)
2.3.2 线性有源二端网络等效参数的测定	(167)
2.3.3 感性负载断电保护电路的设计	(169)
2.3.4 延迟开关的设计	(170)
2.3.5 移相电路的设计	(172)
2.3.6 功率因数的提高	(174)
2.3.7 双 T 形选频网络的设计	(175)
2.3.8 用谐振法测量互感线圈参数	(177)
2.3.9 双口网络等效电路的测定	(178)
2.4 电路实训	(179)
2.4.1 概述	(179)
2.4.2 电路实训的知识准备	(180)
2.4.3 电路实训的主要项目	(184)

3 计算机辅助分析与设计	(190)
3.1 Multisim 9 软件	(190)
3.1.1 概述	(190)
3.1.2 Multisim 9 电路创建	(198)
3.1.3 虚拟仪器仪表	(202)
3.2 Multisim 9 仿真分析	(212)
3.2.1 Multisim 9 仿真特点	(212)
3.2.2 Multisim 9 仿真分析过程	(212)
3.2.3 Multisim 9 仿真参数设置	(213)
3.2.4 Multisim 9 仿真分析	(214)
3.2.5 Multisim 9 仿真后处理	(227)
3.3 仿真实验	(232)
3.3.1 结点电位法、网孔电流法的仿真分析	(232)
3.3.2 最大功率传输的仿真分析	(235)
3.3.3 1 阶电路的仿真分析	(237)
3.3.4 2 阶电路的仿真分析	(238)
3.3.5 电路频率特性的仿真分析	(239)
3.3.6 三相电路的仿真分析	(241)
3.3.7 非正弦周期电路的仿真分析	(243)
3.3.8 网络函数的仿真分析	(245)
参考文献	(247)

1

电路实验与实训基础

现代高等教育应该是一种以能力培养为主线的教育,而实验室、实训基地的建设是高等教育教学基本建设的重要组成部分,是培养高等技术应用性专门人才的基本条件之一。电路实验的重点在于培养学生掌握电工仪表的使用,训练基本接线技能,正确使用电子仪器,学会调试电子电路,并培养学生设计综合实验的能力。电路实训着重培养学生的动手能力和应用理论解决实际问题的能力。电路实验与实训可以使学生较完整地、系统地学习电路基础理论,从而获得在电工测量方面必备的操作技能,并起到巩固、扩展所学理论知识的作用。另外,为了适应科学技术的发展,在实验与实训教程中引入计算机仿真技术,使学生能掌握新技术的发展和应用。希望通过实验与实训的教学能达到以下要求:

- (1) 读懂基本的电路图,具有分析基本电路功能和作用的能力。
- (2) 合理选择元器件,独立确定实验方案和步骤,组装、调试和设计基本电路的能力。
- (3) 掌握常用电工电子测量仪器设备的选择和使用方法。
- (4) 掌握电路性能和功能的测试方法,具有分析和发现基本实验一般故障并自行排除的能力。
- (5) 能独立编写实验与实训报告。

1.1 测量和误差分析

电路实验的重要任务是定量地测量相关电路物理量,而对事物定量地描述又离不开数学方法和进行实验数据的处理。因此,测量方法、误差分析和数据处理是电路实验课的基础。误差理论和数据处理是一切实验结果中不可缺少的内容,是不可分割的两部分。

误差理论是一门独立的学科。随着科学技术的发展,近年来误差理论的基本概念和处理方法也有很大发展。误差理论以数理统计和概率论为其数学基础,研究误差性质、规律及如何消除误差。实验中的误差分析,其目的是对实验结果做出评定,最大限度地减小实验误差,或指出减小实验误差的方向,提高测量质量,提高测量结果的可信赖程度。对低年级大学生,这部分内容难度较大。本课程仅限于介绍误差分析的初步知识,着重点放在几个重要概念及最简单情况下的误差处理方法,不进行严密的数学论证,以减小学生学习的难度,有利于学好电路实验这门基础课程。本章将从测量及误差的定义开始,逐步介绍有关误差和实验数据处理的方法和基本知识。

1.1.1 概述

1) 电工测量的意义和发展趋势

电工测量是指以电工技术为理论依据,以电工电子测量仪器和设备为手段,对各种电量

进行测量。电工测量知识是电类专业学生必须具备的,也是电类专业教学中进行基本技能训练的重要环节。

对电路的量进行测量,是电路实验中极其重要的一个组成部分。电工测量不仅要定性地观察电路现象,更重要的是找出有关电路的量(主要是物理量)之间的定量关系,因此就需要进行定量的测量,以取得电路量数据的表征。实验上把物理量与规定的标准单位的同类物理量或可借以导出的异类物理量进行比较、得出结论的过程就叫做测量。利用电工测量仪表对电路中各个物理量,如电压、电流、功率、电能量等参数的大小进行实验测量就叫做电工测量。把实现电工测量过程所需技术工具的总体叫做电工测量仪表。电工仪表的测量对象主要是物理量中的电学量和磁学量。电学量又分为电量和电参量。通常要求测量的电量有电流、电压、功率、电能、频率等;电参量有电阻、电容、电感等。

电工测量学科在计算机技术、现代检测技术的发展推动下,已成为以智能化、自动化、通用化、高精确度、高灵敏度为标志的学科。测量仪器的发展经历了4个阶段:第1阶段是借助表头指针来显示测量结果的模拟仪器时代;第2阶段是以数字方式显示测量结果的数字化仪器时代;第3阶段是既能进行自动测试又具有一定的数据处理功能的内置微处理器的智能仪器时代;第4阶段是用计算机软件 and 仪器软面板实现仪器的测量和控制功能的虚拟仪器时代。

目前电工测量的教学首先要培养学生以基本电工电子仪器和设备为测量工具的实际动手能力,并学会常见电路物理量的测量方法和常用仪器设备的基本使用方法,还有必须掌握以虚拟仪器为代表的现代测量技术。基本的硬件测量和先进的虚拟测量是相互促进的,常用电工仪器的使用有助于虚拟仿真实验的开设,反之,通过仿真实验的开设进一步熟知常用电工仪器的使用;另一方面,基本测量方法和技术是仿真实验的基础知识,而仿真软件中元件多、仪器多、功能全,又是对基本实验的补充和完善。

2) 电工测量的内容

电工测量的主要内容有:

- (1) 电路物理量的测量:电流、电压(电位)、功率、电能、功率因数、频率、相位、有效值、电阻、电容、电感(自感、互感)、双口网络参数等。
- (2) 电路定律的验证:欧姆定律、基尔霍夫定律、叠加定律、戴维南定律、诺顿定律等。
- (3) 电路特性的测试:电流源电压源的伏安特性、单口网络的伏安特性、理想变压器的伏安特性、电路的频率响应、频率特性等。

3) 电工测量的方法

掌握正确的实验实训方法,是顺利完成实验实训内容,提高实验实训效果的重要保证。电工测量方式常分为:

- (1) 根据获得测量结果的不同方式,分为直接测量法、间接测量法和组合测量法。

① 直接测量法:从测量仪器上直接得到被测量量值的测量方法。直接测量的特点是简便。此时,测量目的与测量对象一致。例如用电压表测量电压、用电桥测量电阻等。

② 间接测量法:通过测量与被测量有函数关系的其他量,才能得到被测量量值的测量方法。例如用伏安法测量电阻。

当被测量不能直接测量,或被测量很复杂,或采用间接测量比采用直接测量能获得更准确的结果时,采用间接测量。间接测量时,测量目的与测量对象是不一致的。

一个电路的量能否直接测量不是绝对的。随着科学技术的发展,测量仪器不断改进,很多原来只能间接测量的量,现在可以直接测量了。比如电能的测量本来是间接测量,现在也可以用电度表来进行直接测量。电路的量的测量,大多数是间接测量,但直接测量是一切测量的基础。

③ 组合测量法:在测量中,若被测量有多个,而且它们与可直接(或间接)测量的电路的量有一定的函数关系,通过联立求解各函数关系来确定被测量的数值,这种测量方式称为组合测量法。

例如,图 1.1.1 所示电路中测定有源线性一端口网络等效参数 R_0 、 U_{OC} ,调节 R_L 为 R_1 时得到电流表的示数为 I_1 ,电压表的示数为 U_1 ;调节 R_L 为 R_2 时得到电流表的示数为 I_2 ,电压表的示数为 U_2 ,根据欧姆定律得到:

$$\begin{cases} U_1 + R_0 I_1 = U_{OC} \\ U_2 + R_0 I_2 = U_{OC} \end{cases}$$

从而求出 R_0 和 U_{OC} 的数值。

(2) 根据测量条件,分为等精度测量和非等精度测量。

等精度测量是指在同一(相同)条件下进行的多次测量,如同一个人,用同一台仪器,每次测量时周围环境条件相同,等精度测量每次测量的可靠程度相同。反之,若每次测量时的条件不同,或测量仪器改变,或测量方法、条件改变,这样所进行的一系列测量叫做非等精度测量,非等精度测量的结果,其可靠程度自然也不相同。电工测量中大多采用等精度测量。应该指出,重复测量必须是重复进行测量的整个操作过程,而不是仅仅为重复读数。

(3) 根据获得测量结果数值的方法,分为直读测量法和比较测量法。

① 直读测量法(直读法):直接根据仪表(仪器)的读数确定测量结果的方法。测量过程中,标准量(即度量器)不直接参与作用。例如用电流表测量电流、用功率表测量功率等。直读测量法的特点是设备简单、操作简便,缺点是测量准确度不高。

② 比较测量法:测量过程中被测量与标准量直接进行比较而获得测量结果的方法。例如用电桥测电阻,测量中作为标准量的标准电阻参与比较。比较测量法的特点是测量准确、灵敏度高,适用于精密测量,但测量操作过程比较麻烦,相应的测量仪器较贵。

综上所述,直读法与直接测量法,比较法与间接测量法,彼此并不相同,但又互有交叉。实际测量中采用哪种方法,应根据对被测量测量的准确度要求以及实验条件是否具备等多种因素具体确定。如测量电阻,当对测量准确度要求不高时,可以用万用表直接测量或伏安法间接测量,它们都属于直读法;当要求测量准确度较高时,则用电桥法进行直接测量,它属于比较测量法。

1.1.2 误差分析

一个被测电路的量,除了用数值和单位表征外,还有一个很重要的用来表征它的参数的便是对测量结果可靠性的定量估计,即误差。这个重要参数却往往容易为人们所忽视,设想如果得到一个测量结果的可靠性几乎为 0,那么这种测量结果还有什么价值呢? 因此,从表

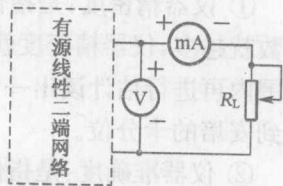


图 1.1.1 有源线性一端口网络等效参数的测定

征被测量这个意义上来说,对测量结果可靠性的定量估计与其数值和单位至少具有同等的重要意义,三者是缺一不可的。

1) 基本概念

(1) 有关测量仪器的基本概念

测量仪器是进行测量的必要工具。熟悉仪器性能、掌握仪器的使用方法及正确进行读数,是每个测量者必备的基础知识。以下先简单介绍仪器精密度、准确度和量程等基本概念。

① 仪器精密度:是指仪器的最小分度相当的量。仪器最小的分度越小,所测量的量的位数就越多,仪器精密度就越高。对测量读数最小一位的取值,一般来讲应在仪器最小分度范围内再进行估计读出一位数字。如具有安培分度的电流表,其精密度的1 A,应该估计读出到安培的十分位。

② 仪器准确度:是指仪器测量读数的可靠程度。它一般标在仪器上或写在仪器说明书上。如电表仪表所标示的级别就是该仪器的准确度。对于没有标准确度的仪器,可粗略地取仪器最小的分度数值或最小分度数值的一半,一般对连续读数的仪器取最小分度数值的一半,对非连续读数的仪器取最小的分度数值。在制造仪器时,其最小的分度数值是受仪器准确度约束的,对不同的仪器准确度是不一样的。

③ 量程:是指仪器所能测量的量的最大值与最小值之差,即仪器的测量范围(有时也将所能测量的最大值称量程)。测量过程中,超过仪器量程使用仪器是不允许的,轻则仪器准确度降低,使用寿命缩短,重则损坏仪器。

(2) 有关测量误差的基本概念

① 真值

真值是表征被测量与给定特定量的定义一致的量值。真值客观存在,但又不可测量。随着科学技术的发展,人们对客观事物的认识不断提高,测量结果的数值会不断接近真值。任何一个测量在一定条件下是客观存在的,当能被完善地确定并能排除所有测量上的缺陷时,通过测量所得的量值称为该量的真值。但是,一个量的完善定义极其困难,人们也不能完全排除测量中的所有缺陷。因而,真值是一个比较抽象和理想的概念,一般来说不可能知道。电路实验课中被测量的真值常采用公认值、理论值或较高准确度结合在一起的测量或多次测量的平均值近似地代替真值,这些值叫做“约定真值”,约定真值的误差可以忽略。相对真值也叫实际值,是在满足规定准确度时用来代替真值使用的值。

② 示值

通过实验所得到的量值也称为测量值。包括:

a. 单次测量值:若只能进行一次测量,如变化过程中的测量,或没有必要进行多次测量;对测量结果的准确度要求不高,有足够的把握;仪器的准确度不高或多次测量结果相同。这时就用单次测得值近似地表示被测量的真值。

b. 算术平均值:对多次等精度重复测量,用所有测量值的算术平均值来替代真值。由数理统计理论可以证明,算术平均值是被测量真值的最佳估计值。

c. 加权平均值:当每个测量值的可信程度或测量准确度不等时,为了区分每个测量值的可靠性,即重要程度,对每个测量值都给一个“权”数。最后测量结果用带上权数的测量值求出的平均值表示,即称为加权平均值。

③ 准确度

准确度表示测量结果与真值的一致程度。由于真值的不可知性,准确度只是一个定性概念,而不能用于定量表达,定量表达应该用“测量不确定度”。

④ 重复性

重复性是指在相同的条件下,对同一被测量进行多次连续测量所得结果之间的一致性。相同条件就是重复条件,包括相同的测量程序、相同的条件、相同的观测人员、相同的测量设备、相同的地点等。

⑤ 误差公理

在实际测量中,由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的限制,只能获得该被测量的近似值,也就是说,一个被测量值 x 与真值 x_0 之间存在差值 Δx ,这种差值称为测量误差,即

$$\Delta x = x - x_0$$

测量误差的存在是不可避免的,也就是说“一切测量都具有误差,误差自始至终存在于所有科学实验的过程中”,这就是误差公理。

人们研究测量误差的目的就是寻找产生误差的原因,认识误差的规律和性质,进而找出减少误差的方法,以求获得尽可能接近真值的测量结果。

2) 测量误差的来源

测量值中存在测量误差通常有下列四方面原因:

(1) 观测者:由于观测者的感觉器官的鉴别能力的局限性,在仪器安置、照准、读数等工作中都会产生误差。同时,观测者的技术水平及工作态度也会对观测结果产生影响。

(2) 测量仪器:测量工作所使用的测量仪器都具有一定的精密度,从而使观测结果的精度受到限制。另外,仪器本身构造上的缺陷,也会使观测结果产生误差。

(3) 外界观测条件:外界观测条件是指野外观测过程中,外界条件的因素,如天气的变化、植被的不同、地面土质松紧的差异、地形的起伏、周围建筑物的状况,以及太阳光线的强弱、照射的角度大小等。

(4) 测量方法:测量方法不合理将会造成误差。例如:用普通万用表测量高内阻网络的端电压就不合理,由此产生的误差就是方法误差。

3) 误差的分类及消除方法

观测误差按其性质,可分为系统误差、偶然误差和粗差。

(1) 系统误差

系统误差是由于仪器制造或校正不完善、观测员生理习性、测量时外界条件、仪器检定不一致等原因引起,在一定条件下多次测量的结果总是向一个方向偏离,其数值一定或按一定规律变化。在同一条件下获得的一组观测中,其数据、符号或保持不变,或按一定的规律变化。系统误差的特征是具有一定的规律性,在观测结果中具有累计性,对结果质量影响显著,应在观测中采取相应措施予以消除。

① 系统误差的来源

a. 仪器误差:是由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的误差。例如,用电流表测量电路中的电流时,由于仪器刻度不准、刻度盘和指针安装偏心而造成误差。

b. 理论误差:它是由于测量所依据的理论公式本身的近似性,或实验条件不能达到理论公式所规定的要求,或测量方法等所带来的误差。例如,用伏安法测量电阻时,由于忽略了电表内阻的影响而造成误差。

c. 观测误差:它是由于观测者本人生理或心理特点造成的误差。例如,用电流表测电流时,由于读数为斜视读出而造成误差。

d. 环境误差:在测量过程中,若环境温度升高或降低,使测量值按一定规律变化,例如在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时标定的标准电阻在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下使用而造成误差。

② 发现系统误差的方法

a. 理论分析法:从原理和测量公式上找原因,看是否满足测量条件。例如,用伏安法测量电阻时,实际中电压表内阻不等于无穷大、电流表内阻不等于 0,会产生系统误差。

b. 实验对比法:改变测量方法和条件,比较差异,从而发现系统误差。例如,调换测量仪器或操作人员,进行对比,观察测量结果是否相同而进行判断确认。

c. 数据分析法:分析数据的规律性,以便发现误差。例如,采用残差法,对一组等精度测量数据,通过计算偏差、观察其大小和比较正、负号的数目,可以寻找系统误差。

③ 消除、减小系统误差的方法

在任何一项实验工作和具体测量中,必须要想尽一切办法,最大限度地消除或减小一切可能存在的系统误差,或者对测量结果进行修正。发现系统误差需要改变实验条件和实验方法,反复进行对比,系统误差的消除或减小是比较复杂的问题,没有固定不变的方法,要具体问题具体分析,各个击破。产生系统误差的原因可能不止一个,一般应找出影响的主要因素,有针对性地消除或减小系统误差。以下介绍几种常用的方法。

a. 检定修正法:将仪器、量具送计量部门检验,取得修正值,以便对某一被测量测量后进行修正。

b. 替代法:测量装置测定被测量后,在测量条件不变的情况下,用一个已知标准量替换被测量来减小系统误差。例如在电表改装实验中测量表头内阻时,如图 1.1.2 所示,首先将 K_2 与表头回路接通,调节 R_1 使 μA 表指到整刻度,记下该电流值,再将 K_2 与电阻箱回路接通,保持 R_1 不变,调节电阻箱 R_2 值,使 μA 表和记下的电流值相同,此时电阻箱的电阻值就等于被测表头的内阻,这种方法避免了测量仪器(μA 表)内阻引入的误差。

c. 异号法:对实验时在两次不同测量条件中出现符号相反的误差,采用取两次误差平均值作为测量结果。例如,在外界磁场作用下,仪表读数会产生一个附加误差,若将仪表位置转动 180° 再进行一次测量,外磁场将对读数产生相反的影响,引起负的附加误差。两次测量结果取平均,正负误差可以抵消,从而可以减小系统误差。

d. 零示法:电桥、电位差计均用这种方法,指零仪器两端等电位(即示零)时测量,可以减小仪器误差和避免指零仪器内阻引入的误差。图 1.1.3 所示为用零示法测量线性有源二端网络的开路电压 U_{oc} 的电路,因为在测量具有高内阻有源二端网络的开路电压时,用电压表直接测量会造成较大的误差,为了消除电压表内阻的影响,往往采用零示测量法。

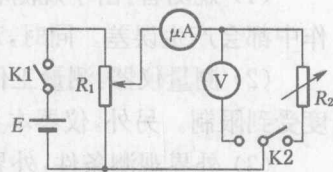


图 1.1.2 用替代法测电表内阻电路图

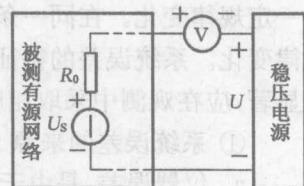


图 1.1.3 零示法

零示法测量原理是用一低内阻的稳压电源与被测有源二端网络进行比较,当稳压电源的输出电压与有源二端网络的开路电压相等时,电压表的读数将为“0”。然后将电路断开,测量此时稳压电源的输出电压,即为被测有源二端网络的开路电压。

(2) 偶然误差

偶然误差的产生取决于观测进行中的一系列不可能严格控制的因素(如湿度、温度、空气振动等)的随机扰动,有时也叫随机误差。在同一条件下获得的观测结果中,其数值、符号不定,表面看没有规律性,实际上是服从一定的统计规律的。

在实际测量条件下,多次测量同一量时,偶然误差的绝对值符号的变化时大时小、时正时负,以不可预见的方式变化。当测量次数很多时,偶然误差就显示出明显的规律性。实践和理论都已证明,偶然误差服从一定的统计规律(正态分布),其特点是: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(单峰性);绝对值相等的正负误差出现的概率相同(对称性);绝对值很大的误差出现的概率趋于0(有界性);误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于0(抵偿性)。因此,增加测量次数可以减小随机误差,但不能完全消除。

引起偶然误差的原因很多。与仪器精密度和观察者感官灵敏度有关。例如:仪器显示数值的估计读数位偏大和偏小;仪器调节平衡时,平衡点确定不准;测量环境扰动变化以及其他不能预测、不能控制的因素,如空间电磁场的干扰、电源电压波动引起测量的变化等。实验中,精密度高是指偶然误差小,而数据很集中;准确度高是指系统误差小,测量的平均值偏离真值小;精确度高是指测量的精密度和准确度都高。数据集中而且偏离真值小,即偶然误差和系统误差都小。

由于测量者过失,如实验方法不合理、用错仪器、操作不当、读错数值或记错数据等引起的误差,是一种人为的过失误差,不属于测量误差,只要测量者采用严肃认真的态度,过失误差是可以避免的。

(3) 粗差

粗差是一些不确定因素引起的误差。国内外学者在粗差的认识上尚无统一的看法,目前的观点主要有几类:一类是将粗差看做与偶然误差具有相同的方差,但期望值不同;一类是将粗差看做与偶然误差具有相同的期望值,但其方差十分巨大;还有一类是认为偶然误差与粗差具有相同的统计性质,但有正态与病态的不同。以上理论均是建立在把偶然误差和粗差均属于连续型随机变量的范畴。还有一些学者认为粗差属于离散型随机变量。当观测值中剔除了粗差,排除了系统误差的影响,或者与偶然误差相比系统误差处于次要地位后,占主导地位的偶然误差就成了我们研究的主要对象。从单个偶然误差来看,其出现的符号和大小没有一定的规律性,但对大量的偶然误差进行统计分析,就能发现其规律性,误差个数越多,规律性越明显。

在实际测量中,由于测量误差的分类是人为的,在不同场合、不同测量条件下,误差之间是可以相互转化的。例如,指示仪表的刻度误差,对于制造厂生产的同一批仪表来说,具有随机性,属于随机误差;对于用户特定的一块仪表来说,该误差是固定不变的,属于系统误差。实验中,精密度高是指随机误差小,而数据很集中;准确度高是指系统误差小,测量的平均值偏离真值小;精确度高是指测量的精密度和准确度都高。数据集中而且偏离真值小,即随机误差和系统误差都小。

4) 测量误差的表示

误差按表达方式分为绝对误差和相对误差。

(1) 绝对误差

绝对误差 Δx 是被测量的实际测量结果 x 减被测量的真值 x_0 后之差,即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.1.1)$$

式中: Δx 为绝对误差; x 为测量值; x_0 为真值。

绝对误差不是误差的绝对值。绝对误差可正可负,具有与被测量相同的量纲和单位,它表示测量值偏离真值的程度。由于真值一般是得不到的,因此误差也无法计算。实际测量中是用多次测量的算术平均值来代替真值。

(2) 相对误差

相对误差是绝对误差与被测量真值之比。由于真值不能确定,实际上常用约定真值来代替。相对误差是一个无单位的无量数,常用百分数表示,即

$$E_r = \left| \frac{\Delta x}{x_0} \right| \times 100\% \quad (1.1.2)$$

相对误差也称为百分误差。显然,相对误差越小,则准确度越高。

(3) 引用误差

引用误差是绝对误差与量程之比,以百分数表示,即

$$E_q = \frac{\Delta x}{A_m} \times 100\% \quad (1.1.3)$$

式中: E_q 为引用误差; A_m 为测量仪表的量程。

因为绝对误差和相对误差不能客观正确地反映仪表的准确度,所以引用误差是为评价测量仪表的准确度等级而引入的。

仪表的精度等级是指最大引用误差,即绝对误差绝对值的最大值 $|\Delta x|_m$ 与仪表量程 A_m 之比,又称为允许误差,即

$$E_{qm} = \frac{|\Delta x|_m}{A_m} \times 100\% \quad (1.1.4)$$

式中: E_{qm} 为最大引用误差; $|\Delta x|_m$ 为绝对误差绝对值的最大值; A_m 为测量仪表的量程。

国家标准 GB 776—1976《测量指示仪表通用技术条件》规定,电测量仪表的准确度等级指数就是把允许误差中的百分号去掉,剩下的数字就称为仪表的精度等级,分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 等七级。仪表的精度等级常以圆圈内的数字标明在仪表的面板上。例如某个电压表的允许误差为 1.5%,这个电工仪表的精度等级就是 1.5,通常简称 1.5 级仪表。

仪表的精度等级为 a ,它表明仪表在正常工作条件下,其最大引用误差的绝对值 $\delta_{\max}$ 不能超过的界限,即

$$E_{qm} \leq a\% \quad (1.1.5)$$

由式(1.1.5)可知,在用仪表进行测量时所能产生的最大绝对误差(简称误差限)为:

$$|\Delta x|_m \leq a\% \times A_m \quad (1.1.6)$$

而用仪表测量的最大值相对误差为:

$$E_{rm} = \frac{|\Delta x|_m}{A_m} \leq a\% \times \frac{A_m}{X} \quad (1.1.7)$$

由式(1.1.7)可以看出,用仪表测量某一被测量所能产生的最大示值相对误差,不会超过仪表允许误差 $a\%$ 乘以仪表测量上限与测量值 X 之比。在实际测量中为可靠起见,可用下式对仪表的测量误差进行估计,即

$$E_{rm} = a\% \times \frac{A_m}{X} \quad (1.1.8)$$

【例 1.1.1】 用量限为 5 A、准确度为 0.5 级的电流表,分别测量 $I_1 = 5$ A, $I_2 = 2.5$ A 两个电流,试求测量 I_1 和 I_2 的相对误差为多少?

$$E_{rm1} = a\% \times \frac{I_m}{I_1} = 0.5\% \times \frac{5}{5} = 0.5\%$$

$$E_{rm2} = a\% \times \frac{I_m}{I_2} = 0.5\% \times \frac{5}{2.5} = 1.0\%$$

由此可见,当仪表的精度等级选定时,所选仪表的测量上限越接近被测量的值,则测量的误差的绝对值越小。

【例 1.1.2】 欲测量约 90 V 的电压,实验室现有 0.5 级 0 ~ 300 V 和 1.0 级 0 ~ 100 V 的电压表。问选用哪一种电压表进行测量为好?

用 0.5 级 0 ~ 300 V 的电压表测量 90 V 的相对误差为:

$$E_{rm0.5} = a_1\% \times \frac{U_m}{U} = 0.5\% \times \frac{300}{90} = 1.7\%$$

用 1.0 级 0 ~ 100 V 的电压表测量 90 V 的相对误差为:

$$E_{rm1.0} = a_2\% \times \frac{U_m}{U} = 1.0\% \times \frac{100}{90} = 1.1\%$$

上例说明,如果选择得当,用量程范围适当的 1.0 级仪表进行测量,能得到比用量程范围大的 0.5 级仪表更准确的结果。因此,在选用仪表时,应根据被测量值的大小,在满足被测量数值范围的前提下,尽可能选择量程小的仪表,并使测量值大于所选仪表满刻度的 $2/3$,即 $X > 2X_m/3$ 。这样就可以达到满足测量误差要求,又可以选择精度等级较低的测量仪表,从而降低仪表的成本。

5) 测量的精密度、准确度和精确度

测量的精密度、准确度和精确度都是评价测量结果的术语,但目前使用时其含义并不一致,以下介绍较为普遍采用的意见。

测量精密度表示在同样测量条件下,对同一被测量进行多次测量,所得结果彼此间相互接近的程度,即测量结果的重复性、测量数据的弥散程度,因而测量精密度是测量偶然误差