



普通高等教育“十二五”创新型规划教材
电气工程及其自动化系列

电工电子实验教程

DIANGONG DIANZI SHIYAN JIAOCHENG

张玲霞 主编



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是在多年实验教学的基础上,经多次修改编写而成的。全书共7章,其中电路实验12个,模拟电子技术实验10个,数字电子技术实验10个,Multisim 9 软件仿真实验11个,共计43个实验项目。本书还针对性地介绍了各种仪器设备,以满足实验室不同配置的需要。

本书既可供高等院校电专业及非电专业各类在校本专科学生使用,也可作为各种成人教育的教材及相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子实验教程/张玲霞主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2012.3

ISBN 978-7-5603-3418-9

普通高等教育“十二五”创新型规划教材·电气工程及其自动化系列

I. ①电… II. ①张… III. ①电工试验-高等学校-教材②电子技术-实验-高等学校-教材 IV. ①TM-33②TN-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 024835 号

策划编辑 王桂芝 赵文斌

责任编辑 王桂芝

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 15.25 字数 380 千字

版 次 2012年3月第1版 2012年3月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-3418-9

定 价 30.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

普通高等教育“十二五”创新型规划教材
电气工程及其自动化系列
编 委 会

主 任 戈宝军

副主任 王淑娟 叶树江 程德福

编 委 (按姓氏笔画排序)

王月志	王燕飞	付光杰	付家才	白雪冰
刘宏达	宋义林	张丽英	周美兰	房俊龙
郭 媛	贾文超	秦进平	黄操军	嵇艳菊

序

随着产业国际竞争的加剧和电子信息科学技术的飞速发展,电气工程及其自动化领域的国际交流日益广泛,而对能够参与国际化工程项目的工程师的需求越来越迫切,这自然对高等学校电气工程及其自动化专业人才的培养提出了更高的要求。

根据《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020)》及教育部“卓越工程师教育培养计划”文件精神,为适应当前课程教学改革与创新人才培养的需要,使“理论教学”与“实践能力培养”相结合,哈尔滨工业大学出版社邀请东北三省十几所高校电气工程及其自动化专业的优秀教师编写了《普通高等教育“十二五”创新型规划教材·电气工程及其自动化系列》教材。该系列教材具有以下特色:

1. 强调平台化完整的知识体系。系列教材涵盖电气工程及其自动化专业的主要技术理论基础课程与实践课程,以专业基础课程为平台,与专业应用课、实践课有机结合,构成了一个通识教育和专业教育的完整教学课程体系。

2. 突出实践思想。系列教材以“项目为牵引”,把科研、科技创新、工程实践成果纳入教材,以“问题、任务”为驱动,让学生带着问题主动学习,在“做中学”,进而将所学理论知识与实践统一起来,适应企业需要,适应社会需求。

3. 培养工程意识。系列教材结合企业需要,注重学生在校工程实践基础知识的学习和新工艺流程、标准规范方面的培训,以缩短学生由毕业生到工程技术人员转换的时间,尽快达到企业岗位目标需求。如从学校出发,为学生设置“专业课导论”之类的铺垫性课程;又如从企业工程实践出发,为学生设置“电气工程师导论”之类的引导性课程,帮助学生尽快熟悉工程知识,并与所学理论有机结合起来。同时注重仿真方法在教学中的作用,以解决教学实验设备因昂贵而不足、不全的问题,使学生容易理解实际工作过程。

本系列教材是哈尔滨工业大学等东北三省十几所高校多年从事电气工程及其自动化专业教学科研工作的多位教授、专家们集体智慧的结晶,也是他们长期教学经验、工作成果的总结与展示。

我深信:这套教材的出版,对于推动电气工程及其自动化专业的教学改革、提高人才培养质量,必将起到重要推动作用。

教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会委员
电气工程及其自动化专业教学指导分委员会副主任委员

戈宝军

2011年7月



前 言

根据我校对实验教学改革的要求,为更好地培养具有创新精神和实践能力的应用型专门人才,我们组织编写了这本实验教程。本教程是在多年实验教学改革的基础上,结合理论课程《电路原理》、《模拟电子技术》及《数字电子技术》的相关内容编写而成。

本教程在编写上,既注意与相应理论课的内容结合、呼应,又着眼实验课程自身的体系与特色。每一个实验都包含有实验目的、实验原理、预习要求、实验内容、实验报告要求、思考题及所需仪器等内容,旨在要教会学生不仅懂得怎样去做,而且要使学生弄清为什么这样做,启发学生就所学内容向深层次发展。

本书侧重于实验方法和实验技能,从实验验证到实验设计,由浅入深。同时还引入了计算机仿真技术,实验内容既可以用计算机仿真,也可以用硬件实验来实现,以加深学生对实验内容的理解,提高实验技能及计算机工具应用水平,尽可能地发挥学生的想像力和创造力。

全书共 7 章:第 1 章 实验基础知识,主要介绍安全用电常识、实验中常见故障的分析与处理,以及测量误差及数据处理。第 2 章 常用电子元器件及仪器设备,主要介绍常用电子元器件的识别、常用实验仪器仪表和实验装置的基本原理及使用方法。第 3 章 电路原理实验,根据实验教学基本要求和教学内容,组织了 12 个实验项目。每个实验项目可在 2~3 学时内完成,能够满足本科实验教学的要求。第 4 章 模拟电子技术实验,组织了常用电子仪器使用、单级共射基本放大电路、共集电极基本放大电路、负反馈放大电路、差分放大电路、功率放大电路、集成运算放大器性能指标测试、集成运放的基本运算电路、RC 正弦波发生器和直流稳压电源 10 个实验项目。第 5 章 数字电子技术实验,组织了数字逻辑实验箱使用练习、门电路逻辑功能及测试、TTL 与非门的参数和特性测试、触发器逻辑功能测试、利用集成逻辑门构成脉冲电路、555 时基电路及计数、译码和显示电路 7 个基础实验和组合逻辑电路设计、时序逻辑电路设计、数字电子钟设计 3 个设计性实验。第 6 章 Multisim 9 软件功能及应用,介绍 Multisim

9 软件的基本功能、操作和分析方法及该软件在电路、模拟电路、数字电路中的应用。第 7 章 Multisim 9 软件仿真实验,共 11 个实验项目。附录部分介绍常用数字集成电路引脚图。

本书由长春大学张玲霞任主编,王晓丽、史丽娟、胡亚瑞、董玉冰任副主编,参加编写的还有吉林省林业勘察设计研究院的金芳和黑龙江工程学院的冷爽。具体编写分工如下:张玲霞、冷爽编写第 1 章和第 3 章;胡亚瑞编写第 2 章;史丽娟编写第 4 章;王晓丽编写第 5 章和附录;金芳编写第 6 章;董玉冰编写第 7 章。全书由张玲霞统稿。

本书由长春大学电子信息工程学院院长李杰教授和李学军教授主审。本书在编写的过程中也参考了一些优秀的教材,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中疏漏及不妥之处在所难免,恳请读者批评指正,以利于本书的进一步完善。

编 者
2012 年 1 月



目 录

第 1 章 实验基础知识	1
1.1 安全用电常识	1
1.1.1 电对人体的伤害	1
1.1.2 安全电压	1
1.1.3 常见的触电方式	2
1.1.4 触电的急救处理	2
1.1.5 实验室安全用电规则	3
1.2 实验中常见故障的分析与处理	3
1.2.1 故障的类型与原因	3
1.2.2 故障的检测	4
1.2.3 故障的预防	4
1.3 测量误差及数据处理	4
1.3.1 产生误差的原因	5
1.3.2 测量误差的分类	5
1.3.3 测量误差的表示方法	5
1.3.4 测量结果的处理	6
第 2 章 常用电子元器件及仪器设备	8
2.1 常用电子元器件	8
2.1.1 电阻器	8
2.1.2 电容器	14
2.2 常用仪器设备	18
2.2.1 直流电流表和电压表	18
2.2.2 交流电流表和电压表	20
2.2.3 功率表	22
2.2.4 交流毫伏表	25
2.2.5 万用表	27
2.2.6 直流稳压电源	31
2.2.7 函数信号发生器	35

2.2.8 双踪示波器	41
2.3 实验装置简介	48
2.3.1 DGJ-1 型高性能电工技术实验装置	48
2.3.2 TPE-D6 型数字电路实验学习机	50
第3章 电路原理实验	52
实验1 常用电子元器件及电工仪表的使用	52
实验2 基尔霍夫定律与电位	56
实验3 电源外特性与叠加定理	59
实验4 戴维宁定理与诺顿定理	63
实验5 典型电信号的观察与测量	67
实验6 RC 电路的响应	70
实验7 交流电路阻抗测量	74
实验8 日光灯电路和功率因数提高	77
实验9 RLC 串联谐振电路	80
实验10 互感电路	84
实验11 三相电路及功率测量	88
实验12 二端口网络测试	92
第4章 模拟电子技术实验	96
实验1 常用电子仪器的使用	96
实验2 单级共射基本放大电路	102
实验3 共集电极基本放大电路	108
实验4 负反馈放大电路	112
实验5 差分放大电路	116
实验6 功率放大电路	120
实验7 集成运算放大器性能指标测试	123
实验8 集成运放的基本运算电路	129
实验9 RC 正弦波发生电路	133
实验10 直流稳压电源	136
第5章 数字电子技术实验	145
实验1 数字逻辑实验箱使用练习	145
实验2 门电路逻辑功能及测试	148
实验3 TTL 与非门的参数和特性测试	152
实验4 触发器逻辑功能测试	154
实验5 利用集成逻辑门构成脉冲电路	158
实验6 555 时基电路	160

实验 7 计数、译码、显示电路	163
实验 8 组合逻辑电路设计	167
实验 9 时序逻辑电路设计	170
实验 10 数字电子钟设计	173
第 6 章 Multisim 9 软件功能及应用	177
6.1 Multisim 9 基本操作	177
6.1.1 Multisim 9 基本界面	177
6.1.2 文件基本操作	178
6.1.3 元器件基本操作	178
6.1.4 文本基本编辑	178
6.1.5 图纸标题栏编辑	179
6.1.6 子电路创建	180
6.2 Multisim 9 电路创建	180
6.2.1 元器件	180
6.2.2 电路图属性	181
6.2.3 电路的连接	182
6.3 Multisim 9 操作界面	184
6.3.1 Multisim 9 菜单栏	184
6.3.2 Multisim 9 元器件栏	190
6.3.3 Multisim 9 仪器仪表栏	190
6.4 Multisim 9 分析方法	190
6.4.1 Multisim 9 的结果分析菜单	191
6.4.2 直流工作点分析	191
6.4.3 交流分析	193
6.4.4 瞬态分析	194
6.5 Multisim 9 软件仿真实验举例	195
6.5.1 电路理论仿真实验——戴维宁定理和诺顿定理的验证	195
6.5.2 模拟电路仿真实验——单级放大电路实验	196
6.5.3 数字电路仿真实验——顺序脉冲发生器实验	201
6.5.4 综合设计仿真实验——简易数字频率计的设计实验	202
第 7 章 Multisim 9 软件仿真实验	206
实验 1 直流电路中的功率传递	206
实验 2 串联交流电路的阻抗	207
实验 3 交流电路的功率和功率因数	208
实验 4 一阶动态电路的动态过程	210
实验 5 RLC 串联电路的动态过程	211

实验 6 负反馈放大电路	213
实验 7 串联型晶体管稳压电路	214
实验 8 波形发生器应用的测量	216
实验 9 二阶低通滤波器	218
实验 10 数字电路基本实验	220
实验 11 综合设计性实验——数字电子钟的设计	222
附录	225
TPE-D6 型数字电路实验学习机常用集成电路引脚图	225
参考文献	231



第1章 实验基础知识

1.1 安全用电常识

1.1.1 电对人体的伤害

电对人体的伤害,主要来自电流。人体是导体,当人不慎触及电源或带电导体时,电流流过人体,产生触电,使人受到伤害。电流对人体的伤害按伤害的程度可分为两种类型:电伤和电击。电伤是电流的热效应或机械效应对人体造成的局部伤害。如电灼伤、电烙印、皮肤金属化等。电击是电流通过人体内部,破坏人的心脏、神经系统、肺部的正常工作而造成的伤害。这是经常遇到的一种伤害,也是造成触电死亡的主要原因。

触电的危险程度与流过人体电流的大小,电流持续的时间,电流的频率,电流通过人体的途径及人体状况等因素有关。

(1) 人体对电流的反应:以工频电流为例,当 $100 \sim 200 \mu\text{A}$ 的电流通过人体时,对人体无害反而能治病; 1 mA 左右引起微麻的感觉;不超过 10 mA 时,有强烈麻的感觉,人尚可摆脱电源;超过 30 mA 时,感到剧痛,神经麻痹,呼吸困难,有生命危险;达到 100 mA 时,很短时间使人心跳停止。

(2) 伤害程度与通电时间的关系:电流通过人体的时间愈长,则伤害愈大。

(3) 伤害程度与电流种类的关系:电流频率在 $40 \sim 60 \text{ Hz}$ 对人体的伤害最大。

(4) 伤害程度与电流途径的关系:电流的路径通过心脏会导致神经失常、心跳停止、血液循环中断,危险性最大。其中电流路径从手到手或从手到脚是最危险的,特别是电流流经从右手到左脚的路径是最危险的,而从脚到脚的危害性相对较小。

(5) 伤害程度与人体状况的关系:电流对人体的作用,女性较男性敏感;小孩遭受电击较成人危险;同时与体重有关系。

1.1.2 安全电压

安全电压是指不会使人直接致死或致残的电压。

人体的电阻因人而异,与人的体质、皮肤的干湿程度、洁污度、触电电压的高低、年龄、性别以至工种职业有关系。通常皮肤干燥时,人体电阻一般可达数千欧,而皮肤湿润时,只有 $1 \text{ k}\Omega$ 左右。所加电压增大、持续时间增加,则人体电阻减小。如果人体与地面的绝缘良好(如人站在绝缘物体上),将使触电的危险性大大减小。

因此,我国规定安全生产电压的等级为 36 V 、 24 V 、 12 V 、 6 V 。一般情况下,也就是干燥而

触电危险性较大的环境下,安全电压规定为 36 V;在潮湿及地面能导电的厂房,安全电压规定为 24 V;对于潮湿而触电危险性较大的环境,如在金属容器、管道内施焊检修,安全电压规定为 12 V;而在环境十分恶劣的条件下,安全电压规定为 6 V。这样,触电时通过人体的电流,可被限制在较小范围内,可在一定的程度上保障人身安全。安全电压值的规定各国有所不同,例如,荷兰和瑞典规定为 24 V;美国规定为 40 V;法国规定交流电为 24 V,直流电为 50 V;波兰、瑞士、捷克斯洛伐克规定为 50 V。

1.1.3 常见的触电方式

常见的触电方式分为三种:单相触电、两相触电和跨步触电。

1. 单相触电

人站在地面上,人体的某一部位碰到相线俗称火线时,电流由相线经人体流入大地的触电,称为单相触电。单相触电发生的机会最多,这是因为现在广泛采用三相四线制供电,且中性线俗称零线,一般都接地。

2. 两相触电

当人体的不同部位分别接触到同一电源的两根不同相位的相线时,电流由一根相线经人体流到另一根相线的触电,称为两相触电。两相触电发生时,流经人体的电流较大,且大部分经过心脏,比单相触电更危险。

3. 跨步触电

由跨步电压引起的触电,称为跨步触电。所谓跨步电压就是当高压线接触地面时,电流在接地点周围 10 米的范围内将产生电压降,当人体接近此区域时,两脚之间承受一定的电压,此电压称为跨步电压。跨步电压一般发生在高压设备附近,因此在遇到高压设备时应慎重对待,避免受到伤害。

1.1.4 触电的急救处理

当发生触电事故时,要及时进行必要的急救处理。

1. 脱离电源

具体操作如下:

(1) 如果电源开关就在附近,应立即切断电源。

(2) 如果电源开关离救护人员较远,可用绝缘物体如干燥的木棒或其他带有绝缘手柄的工具迅速使触电者脱离电源,也可用绝缘手钳或带有干燥木柄的刀或其他工具将电线切断,从而使触电者脱离电源。

(3) 救护人员在帮助触电者脱离电源的过程中,切不可直接手拉触电者,也不能用金属等导电物体去做抢救工具,以防救护人员自身触电。

2. 急救处理

当触电者脱离电源后,应立即进行现场急救,同时通知医护人员前来抢救。只有在现场危及安全时,才允许将触电者移至安全的地方进行急救。如果伤者的伤势不重,神志清醒,只是心慌无力,应让伤者平卧休息 1~2 h,有过早搏动者应观察 24 h。对于重伤者,应立即在现场进行抢救,对心跳停而呼吸未停者可做胸外心脏按压,60~70 次/min;对呼吸停止而心跳未停者应进行人工呼吸。如果伤者出现假死现象,千万别放弃,一定要坚持救护,直到伤者复苏或

医务人员前来救治为止。

1.1.5 实验室安全用电规则

(1) 接线、改线、拆线都必须在切断电源的情况下进行,即先接线后通电,先断电再拆线,不能带电操作。

(2) 接线完毕后,认真复查,经老师检查同意后方可接通电源进行实验。

(3) 在通电情况下,人体严禁接触电路中不绝缘的金属导线或连接点等带电部位。万一遇到触电事故,应立即切断电源,进行必要的处理。

(4) 实验中,特别是设备刚投入运行时,要随时注意仪器设备的运行情况,如发现有过热、异味、异声、冒烟、打火等时,应立即断电,并报告指导老师,切不可惊惶失措,以防事故扩大。

(5) 如果实验所用的电源是可调的,应从零缓慢升高电压,同时注意各仪器仪表的指示有无异常,如有异常,应立即切断电源,并报告指导老师。

1.2 实验中常见故障的分析与处理

在电工电子实验中,由于各种各样的原因,常常会出现一些故障,致使实验电路不能正常工作,这些故障轻者造成实验数据的误差,重者有可能会烧坏仪表和元器件,甚至危及实验人员的人身安全。通过对电路故障的分析与处理,能提高学生分析问题与解决问题的能力,增加实践经验,更有利于在以后的实验中减少故障。

1.2.1 故障的类型与原因

实验故障根据其严重性一般可以分为两大类:破坏性故障和非破坏性故障。破坏性故障可造成仪器设备、元器件等损坏,其现象常常是某些元器件过热并伴有刺鼻的异味、局部冒烟、发出吱吱的声音或炮竹似的爆炸声等。非破坏性故障由于暂时不造成元器件的损坏,一般较难发现,其现象是电路中电压或电流的数值不正常或信号波形发生畸变等。如果不能及时发现并排除故障,将会影响实验的正常进行,甚至造成损失。

引起故障的原因大致有以下几种:

(1) 电源接错。这是由于实验人员对实验室的供电系统不熟所致,故实验前要先了解实验室的供电系统,选择合适的电源,不能见电源就接。

(2) 电路连接错误。这种故障主要是由于实验人员粗心造成的,所以电路连接时要认真细致,连接完成后要仔细检查,切不可马虎。

(3) 元器件接错或参数选择不当。这是由于实验人员对所用元件的特征及性能不熟悉。

(4) 仪器仪表使用不当或损坏。如量程选择不正确等。

(5) 所用导线内部断裂、导线裸露部分因意外相碰而短路或电路连接点接触不良。因此实验前应检查一下所用导线,剔除不合格的导线。电路接完后,应将不用的导线及其他物品移开,以免造成短路事故。

(6) 电源、实验电路、测试仪器、仪表之间公共参考点连接错误或参考点位置选择不当。

1.2.2 故障的检测

故障检测的方法很多,不管采取哪种方法都要首先确定发生故障的原因和发生故障的部位,只有找到故障部位,才能排除故障。常用的故障检测方法有两种:通电检测法和断电检测法。

1. 通电检测法

用万用表、电压表、示波器等仪器在接通电源情况下进行电压或波形的测量,若发现异常,则要进一步分析引起异常的原因,找出故障点,加以排除。

2. 断电检测法

对破坏性故障,要采用断电检测法。具体方法是先切断电源,然后用万用表的欧姆挡检查电路中某两点有无短路、开路、元器件参数是否正确等。当发生破坏性故障后,在没排除故障前,不可轻易进行通电检查,以免引起更大的损失。有时电路中可能同时存在多种或多个故障,它们相互影响、相互掩盖,但只要耐心细致去分析查找,是能够检测出来的。

1.2.3 故障的预防

对电路及仪器设备进行必要的检查和调试,可以减少实验故障,使实验能安全、准确地进行。

1. 通电前的检查

在连接电路前,要先对所用元器件、导线等进行检测,保证其完好无损。连完电路后,在通电之前,要再对电路进行检查。

(1) 检查所用设备和元器件是否符合要求,连接是否正确,对有极性的元件如二极管、电解电容等,检查其极性是否接反。

(2) 检查电路的接线是否正确,检查电源线、地线、信号线的连接是否正确,电路中有无短路或接触不良的情况,电路中有无多接或漏接的情况。

(3) 用电压表测量电源电压,检查电源是否正常,是否符合电路的要求。

(4) 对所用仪器仪表进行检查,检查各仪器仪表的工作模式、量程等是否正确。

2. 通电后的检查

在上述检查无误后,接通电源。通电后,首先要观察电路有无异常现象,如电路是否有打火、冒烟等现象,是否有异常气味,是否有异常的声响等,如有异常情况发生,应立即关断电源,检查故障原因,等排除故障后方可通电。

1.3 测量误差及数据处理

在实验过程中,无论用什么样的测量方法,无论多么仔细,由于测量方法不完善、测量仪器不准确、测量环境和测量人员的水平等诸多因素的限制,都会使测量结果与被测量的真值在数量上存在差异,这个差异就是测量误差。因此,分析误差产生的原因,以使人们在实验过程中尽量减少误差,使实验结果更精确,是实验过程中非常重要的环节之一。

1.3.1 产生误差的原因

产生误差的原因主要有以下几个方面：

- (1) 仪器误差。这是由仪器本身的性能决定的。
- (2) 操作误差。在仪器使用过程中,由于量程使用不当等造成的误差。
- (3) 读数误差。由于人的感觉器官的限制所造成的误差。
- (4) 理论误差。也称为方法误差,是由于使用的测量方法不完善而引起的误差。比如实验过程中使用了近似计算公式,或忽略了某些分布参数等。
- (5) 环境误差。受环境温度、湿度、电磁场等影响而产生的误差。

1.3.2 测量误差的分类

根据误差的性质和来源可以分为系统误差、随机误差和粗差三大类。

1. 系统误差

系统误差是指在相同条件下重复测量同一个量时所出现误差的绝对值和符号保持不变,或按一定规律变化的误差。系统误差产生的原因主要是仪器仪表的制造、安装、使用方法不当、测量环境不同或读数方法不当等原因造成的。在实验过程中,通过实验及分析,查明误差原因,可以减少或消除误差。

2. 随机误差

随机误差也称为偶然误差,是指在测量过程中误差的大小和符号都不固定,由于一些偶发性因素所引起的误差。通常这类误差的变化规律很难发现,一般不能用实验方法消除。但在大量的重复测量中,可以发现随机误差符合正态分布规律,采用统计的方法进行估算。其中最简单的方法就是取多次测量数据的平均值,因为随着测量次数的增加,随机误差的算术平均值趋近于零,所以多次测量结果的算术平均值将更接近于真值。

3. 粗差

粗差也叫疏失误差,是操作者的粗心大意造成的误差。例如把正确的测量方法作不合理的简化、读错或记错数据、仪表量程换算有误等。此类误差没有规律可循,只要细心操作、加强责任感,此误差是可以避免的。

上述3种误差与测量结果有着密切关系。系统误差着重说明测量结果的准确度;随机误差是在良好的测量条件下,多次重复测量时,各次测量数据间存在微小的差别,这种误差说明测量结果的精密度;粗差是由测量人员的过失造成,一经发现,数据应作废或重做。

1.3.3 测量误差的表示方法

1. 绝对误差

绝对误差是指测量值 X 与被测量的真值 X_0 之间的差值,用 ΔX 表示,即

$$\Delta X = X - X_0 \quad (1.1)$$

由于被测量的真值一般是无法得到的,所以在实际应用中,一般用高一级标准仪器所测量的值(实际值)来代替真值。

绝对误差反映了测量值与实际值的偏离程度和偏离方向,但不能说明测量的准确程度。

2. 相对误差

相对误差为绝对误差与被测量真值之比,一般用百分数形式表示,即

$$\gamma_0 = \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\% \quad (1.2)$$

这里真值 X_0 也可用测量值 X 代替,即绝对误差与仪器的示值 X 之比,一般用百分数形式表示为

$$\gamma_x = \frac{\Delta X}{X} \times 100\% \quad (1.3)$$

注意 在误差比较小时, γ_0 和 γ_x 相差不大,无须区分,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 γ_0 称为真值相对误差或实际值相对误差,而把 γ_x 称为示值相对误差。

在测量实践中,常常使用相对误差来表示测量的准确程度,因为它方便、直观。相对误差愈小,测量的准确度就愈高。

3. 引用误差

引用误差为绝对误差与测量仪表量程 X_m (满刻度值) 之比,一般用百分数形式表示,即

$$\gamma_n = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\% \quad (1.4)$$

4. 仪表的精确度

测量仪表的精确度等级是用最大引用误差(又称允许误差)来划分的,它等于仪表的最大绝对误差与仪表量程范围之比的百分数,即

$$\gamma_{nm} = \frac{|\Delta X|_m}{X_m} \times 100\% \quad (1.5)$$

仪表的精确度等级是国家统一规定的,把最大引用误差中的百分号去掉,剩下的数字就称为仪表的精确度等级。电工仪表共分7级:0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0。引用误差是为了评价测量仪表的准确度等级而引入的,它可以较好地反映仪表的准确度,引用误差越小,仪表的准确度越高。

1.3.4 测量结果的处理

测量结果一般用数字或曲线图表示,测量结果的处理就是要对实验中所测得的数据进行分析,以便得出正确的结论。

1. 测量结果的数字处理

有效数字: 实验中从仪表上读取的数值的位数,取决于测量仪表的精度。由于存在误差,测量的数据总是近似值,读数通常由可靠数字和欠准数字两部分组成,统称为有效数字。对于刻度式仪表,一般认为,在仪表最小刻度上直接读出的数值是可靠数字,最小刻度以下还能再估读一位,这一位数字是欠准数字,所以读数的最后一位数字是仪表精度所决定的估计数字,一般为测量仪表最小刻度的 $1/10$ 。有效数值是指从左边第一个非零的数字开始,直到右边最后一个数字为止的所有数字。例如 0.005 8 具有两位有效数字;580.0 有四位有效数字,所以在测量仪表上显示的最后一位数是“0”时,这个“0”也是有效数字,也要读出和记录。

有效数字的运算规则如下:

(1) 在记录测量数值时,只保留一位有效数字。

(2) 当有效数字位数确定后,采用“小于5则舍,大于5则入,正好等于5则奇变偶”的原则。如5.58保留两位有效数字则为5.6,而5.85保留两位有效数字为5.8。

(3) 对多个数据进行加减运算时,对于参加运算的多个数据,应保留的有效数字应以各数中小数点后位数最少的那个数为准(如果没有小数点,则以有效数值位数最小的数为准),其余各位数均舍入至比该数多一位。而运算结果应保留的小数点后的位数应与参与运算的各数中小数点后位数最少的那个数相同。如对18.23、1.2、15.367这三个数相加,应写为 $18.23 + 1.2 + 15.37 = 34.8$,而不是 $18.23 + 1.2 + 15.367 = 34.797$ 。

(4) 对多个数据进行乘除运算时,以参与运算数据中有效数值位数最小的那个数为准,其余各数均舍入到比该数多一位,而计算结果应与参加运算数据中有效数值位数最小的相同。

(5) 将数据平方或开方时,若作为中间运算结果,可比原数多保留一位。

(6) 对参与运算的 e 、 π 、 $\sqrt{2}$ 等常数,可取比按有效数字运算规则规定的多保留一位。

(7) 为防止多次舍入引起计算误差,当有多个数据参加运算时,在运算中途应比按有效数字运算规则规定的多保留一位,但运算的最后结果这一位仍应作舍入处理。

2. 测量结果的曲线处理

测量结果用曲线表示往往更形象、更直观,但由于各种误差的存在,如果将实际测量的数据直接连接起来,得到的将不是一条光滑的曲线,而是呈波动的折线。而实验曲线的绘制,是将测量的离散数据绘制成一条连续光滑的曲线,并使其误差尽可能的小。在绘制实验曲线时,应注意以下几点:

(1) 合理选择坐标和坐标的分度,标明坐标代表的物理量和单位。实验中最常用的是直角坐标系,一般横坐标代表自变量,纵坐标代表因变量。横坐标和纵坐标的分度可以取值不一样。

(2) 合理选择测量点的数量。测量点的数量应根据曲线的具体形状而定,对于曲线变化平坦的部分,可以少取几个测量点,而曲线变化较大的部分或某些重要的细节部分,应多测量一些点。各测量点的间隔也要合理,以便能绘制出符合实际情况的曲线。

(3) 修匀曲线。修匀曲线就是应用误差理论,把因各种因素引起的曲线波动抹平,使曲线变得光滑均匀。常用的方法有直觉法和分组平均法。

直觉法:是在精度要求不高或者测量点的离散程度不太大时,先将各测量点用折线相连,然后用曲线板凭直觉使曲线变得光滑。这种方法在作图时,不要求曲线通过每一个测试点,而是从整体上看,曲线尽可能靠近各数据点,且曲线两边的数据基本相等,即各数据点均匀、随机地分布在曲线的两侧,并且曲线是光滑的。

分组平均法:适用于测量点的离散程度较大的测量。方法是将测量点分成若干组,每组包含2~4个测量点,分别求出各组数据的几何重心的坐标,再将这些重心连成一条光滑曲线。由于取重心的过程是取平均值的过程,所以分组平均法可以减小随机误差的影响。在一般情况下采用分组平均法时,如果曲线斜率变化较大或变化规律较重要的地方可分得细一些,而曲线较为平坦的地方相对分得粗一些。