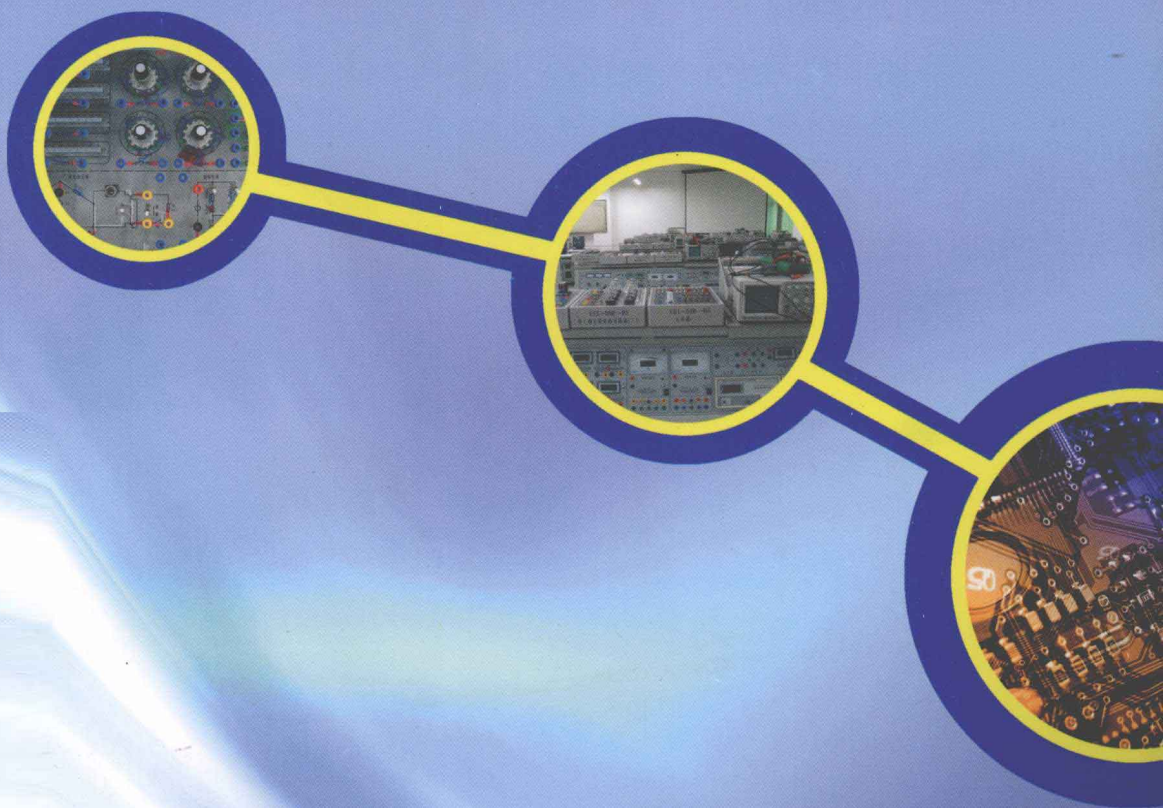


福建省高等学校省级实验教学示范中心
——厦门大学机电工程训练中心系列教材

电工电路实验教程

陈新 主编



厦门大学出版社
XIAMEN UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

电工电路实验教程/陈新主编. —厦门:厦门大学出版社, 2010. 7

ISBN 978-7-5615-3627-8

I. ①电… II. ①陈… III. ①电工技术-实验-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(2010)第 143455 号

厦门大学出版社出版发行

(地址:厦门市软件园二期望海路 39 号 邮编:361008)

<http://www.xmupress.com>

xmup@public.xm.fj.cn

沙县方圆印刷有限公司印刷

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:13.25

字数:339 千字 印数:1~2000 册

定价:22.00 元

本书如有印装质量问题请直接寄承印厂调换

前 言

本书作为福建省高等学校省级实验教学示范中心——厦门大学机电工程训练中心系列教材之一,依附于《电路》、《电工学》等理论教材,针对专门的实验设备和仪器仪表编写而成。全书涵盖了电路实验和电工学实验的内容,其中以电路实验为主要部分。本教材由九大实验单元组成,单元中实验任务的安排由浅入深,从传统理论验证性的实验任务逐渐过渡到综合性、设计性的实验任务。适用于大学本科一二年级电类和非电类专业的实验课程使用,同时也可作为相关专业研究生的实验参考教材和资料使用。

第一、第二、第三章为实验操作前的准备单元,其中第一章是基础知识部分,对实验过程的规范操作、实验数据的记录和处理、实验报告的撰写提出相应要求。另外,实验室以及日常安全用电常识也是本章的重点之一。第二章是对 Multisim 10 电路仿真软件(2007 年版本)的介绍,要求通过学习能够初步掌握此仿真软件的操作和运用,为今后实验预习、拓展和开放实验的完成提供多种手段。第三章首先介绍了实验室的工作环境、工作台仪器仪表的构成及操作应用方法,然后通过一些实验训练的过程,使同学对常用电工仪表进一步了解,能更深入地掌握其工作原理和操作方法。

第四、第六和第七章是和理论课相配套的直流电路单元、暂态电路单元以及有源电路与双口网络实验单元,其中也包含了一些综合拓展性实验,目的是通过实验技能的训练,提高学生理论分析实际问题,解决问题的能力,培养工程意识。

第五章和第八章,主要为交流电路实验单元以及变压器与电机拖动实验单元,其中包含有验证性实验和实践性很强的实验项目。部分项目可作为开放性和拓展性实验,同学可根据自身的能力和兴趣,选择其中的实验在实验室工作台或利用计算机仿真软件进行操作实践。

第九章是电子技术实验单元,是为包含电子部分的《电工学》专业课程设置。这部分一共有五个实验,包括模拟电路和数字电路实验,是电子技术的基础实验内容。本单元每个实验都包含拓展实验部分,希望有能力和感兴趣的同学可以进一步探讨。

最后部分是五个附录,主要介绍实验室配备的数字万用表、双踪示波器、函数信号发生器和数字交流毫伏表等。内容包含其工作原理、内部电路构成和使用方

法,通过常规电工实验仪器仪表的学习,为今后学习和工作打下扎实的基础。

全书共分为 9 章和 5 个附录,其中王晓红、陈新完成第四和第五章内容和图表的编写、校对工作,黄文娟、陈新完成第八章、第九章内容和图表的编写、校对工作,陈新完成第一章、第二章、第六章、第七章和附录的编写以及全书的最终校对工作,沈绿楠完成第三章的编写和部分章节图表的绘制、校对工作。全书的写作提纲及内容由李继芳审核修订完成。整个撰写过程得到了厦门大学物理与机电工程学院、机电工程训练中心和机电工程系的各位领导以及电工实验室全体同仁们的热心帮助,仿真软件得到 NI 公司的鼎力支持,在此特致以诚挚的感谢。

由于作者水平和经验有限,加之时间仓促,书中难免存在疏漏、错误和不足,敬请各位专家和读者指正。

作者

2010 年 8 月于厦门大学

目 录

前言	1
第一章 电工电路实验基础知识单元	1
1-1 实验总体要求	1
1-2 实验室安全用电常识	4
1-3 测量的基本知识	6
第二章 Multisim 电路仿真实验单元	16
2-1 Multisim 10 使用简介	16
2-2 电路图的输入	16
2-3 纵览(Overview)	23
2-4 实验内容	30
2-5 思考题	32
2-6 注意事项	32
第三章 电工电路基本测量与常用仪表实验单元	33
3-1 实验一 认识实验	33
3-2 实验二 直流电压表、电流表量程的扩展	37
3-3 实验三 基本电工仪表的使用与测量误差的计算	40
3-4 实验四 减小仪表测量误差的方法	44
3-5 实验五 欧姆表的设计	48
3-6 实验六 电阻元件伏安特性的测绘	50
3-7 实验七 未知电阻元件伏安特性的测绘	53
3-8 实验八 电位、电压的测定及电路电位图的绘制	55
第四章 直流电路实验单元	57
4-1 实验一 基尔霍夫定律的验证与线性电路叠加性和齐次性	57
4-2 实验二 电路排故的研究	62
4-3 实验三 电压源、电流源及其电源等效变换的研究	64
4-4 实验四 有源二端网络等效定理及等效参数的测定	68
4-5 实验五 最大功率传输条件的研究	73
第五章 交流电路实验单元	75
5-1 实验一 交流串联电路的研究	75
5-2 实验二 提高功率因数的研究	78
5-3 实验三 三相电路电压、电流的测量	81
5-4 实验四 三相电路功率的测量	84
5-5 实验五 三相交流电路相序测量	88

5-6 实验六 单相电度表的校验	90
第六章 暂态电路及频率特性实验单元	93
6-1 实验一 典型电信号的观察与测量	93
6-2 实验二 观测周期性信号的有效值、平均值和幅值	97
6-3 实验三 一阶电路暂态过程的研究	100
6-4 实验四 二阶电路暂态过程的研究	104
6-5 实验五 交流电路频率特性的测定	107
6-6 实验六 RC 网络频率特性和选频特性的研究	110
第七章 有源电路与双口网络实验单元	113
7-1 实验一 受控源研究	113
7-2 实验二 直流双口网络的研究	119
7-3 实验三 负阻抗变换器及其应用	122
7-4 实验四 回转器特性测试	125
第八章 变压器与电机拖动实验单元	128
8-1 实验一 互感线圈电路的研究	128
8-2 实验二 单相铁芯变压器特性的测试	131
8-3 实验三 三相异步电动机	134
8-4 实验四 三相异步电动机点动、起动、停车控制	137
8-5 实验五 三相异步电动机的正、反转控制	140
第九章 电子技术实验单元	143
9-1 实验一 单管放大电路	143
9-2 实验二 运算放大器的线性应用	151
9-3 实验三 直流稳压电源	158
9-4 实验四 组合逻辑电路和译码器的应用	163
9-5 实验五 组合逻辑电路设计及应用	169
附录一 MT-1280 数字万用表	171
附录二 YB43020B 双踪示波器	178
附录三 YB1602D 函数信号发生器	194
附录四 YB2172B 数字交流毫伏表	200
附录五 厦门大学电工电路实验报告	203
参考文献	206

第一章 电工电路实验基础知识单元

1-1 实验总体要求

电工电路实验是电类与少课时非电类各专业重要的实践性教学课程,通过它可对学生进行电路实验技能的训练,锻炼其实践动手能力,使其学会进行电路实验的基本方法,同时也使学生进一步加深对电路理论知识的理解和掌握,并且培养良好的实验习惯,树立实事求是、严谨认真的科学作风。

在课程中将主要学习有关电路实验的基础知识,包括测量及测量误差的概念、测量数据的处理方法,常用电路测量仪器仪表的结构、工作原理及其正确使用方法以及电路测量的基本技能和基本方法。

一、课程教学内容

本课程的教学分单元进行,即把若干个实验内容联系紧密、所用设备相近的实验组成一个教学单元,按照循序渐进的原则,逐步培养学生的实验能力。各单元的若干个实验中,根据理论课学习情况和同学的能力,分为必做内容和选做内容。选做实验可在实验课中进行,也可在实验室开放时间内完成。

各实验教学单元如下:

1. 电工电路实验基础知识单元;
2. Multisim 电路仿真实验单元;
3. 电工电路基本测量与常用仪表实验单元;
4. 直流电路实验单元;
5. 交流电路实验单元;
6. 暂态电路及频率特性实验单元;
7. 有源电路与双口网络实验单元;
8. 变压器与电机拖动实验单元;
9. 电子技术实验单元。

二、课程对实验技能的要求

培养和提高实验技能是电路实验课的基本目的之一。本课程对实验技能的基本要求如下。

1. 熟悉常用电工仪器仪表的用法

(1) 会正确使用电流表、电压表、万用表、功率表及其他常用的电工实验仪器仪表;

(2) 熟悉示波器(电子示波器、数字示波器)、函数信号发生器、稳压稳流电源、交流毫伏表等仪器的使用方法。

2. 掌握下列电路测量方法

- (1) 电压、电流、功率的测量；
- (2) 电阻、电感、电容、互感等元件参数的测量；
- (3) 电信号波形的观察、测量；
- (4) 电路元件或网络端口特性的测量；
- (5) 会用实验手段验证一些定理和结论。

3. 掌握实验操作规则及方法

- (1) 能正确地连接实验电路,线路布局合理,仪器设备摆放整齐；
- (2) 能正确地读取、记录实验数据,并对观察到的实验现象有一定的分析判断能力；
- (3) 初步具备发现和排除电路故障的能力；
- (4) 能用 Multisim 仿真软件仿真各类电路。

4. 初步具备综合实验的能力

能根据给定的实验任务制订实验方案、设计实验线路、确定参数、选择仪器仪表、拟定数据记录表格并完成具体的实验操作。对实验中应注意的事项做到心中有数。

5. 实验报告规范

能写出合乎要求的实验报告。正确绘制各种图表,具有分析、处理实验数据的初步能力,结合已经学习的理论知识,能对实验结果作出较为合理的解释。

三、实验课的教学方法

实验课通常分为课前预习、进行实验和课后完成实验报告三个阶段。

1. 课前预习

课前预习是实验课的准备阶段。预习是否充分,关系到实验能否顺利进行及能否收到预期效果,因此,课前预习必须予以强调,引起重视。

课前预习阶段应完成下述工作:

(1) 认真阅读实验指导书中本次实验相关内容部分并复习有关的理论知识。弄清实验原理,明确实验的目的和任务,了解实验的方法和步骤,并了解实验过程中要观察的现象、要记录的数据及应注意的事项。

(2) 完成理论数据的计算以作为实验过程中数据的比较依据,有条件的可事先对实验电路进行仿真。仿真分析是运用专门仿真软件对实验电路特性进行分析和调试的一种虚拟实验手段,借助于仿真软件对实验电路反复更改、调整和测试,可指导真实实验,提高实验效率,是对实际实验的一种有益补充。

(3) 完成预习报告。预习报告包括实验报告中的实验目的、实验任务、实验原理、实验线路、注意事项等项目。预习报告是预习准备工作好坏的反映,实验前需将预习报告交指导教师检查。本次预习或预习报告不合格者不得进行实验。

2. 进行实验

学生需在指定时间到实验室完成实验,实验过程中应遵守操作规程和实验室有关规定。

实验一般按下述程序进行:

(1) 学生到指定的实验台进行实验前的准备工作,包括清点当天实验用仪器设备并了解仪器的使用方法,做好实验记录的准备工作,将设备摆放整齐,查看“设备使用记录”等。

(2) 指导教师讲解实验要求及注意事项。

(3) 按实验线路图接好线路,经自查无误并请指导教师复查或同意后,方可合上电源。务必注意,切不可不经指导教师许可而擅自合上电源,避免出现人身和设备的安全事故。

(4) 按拟定的实验步骤进行操作,观察现象,读取、记录数据。注意:实验数据需记录于预习报告的表格中,表格须用工具绘制,不可徒手画。数据不能用铅笔记录。

(5) 完成全部的实验操作后,将实验数据交指导教师检查并由教师在原始记录上签字(实验者须对自己的原始数据负责,指导教师签字只表示确认实验者进行了该项实验)。注意:指导教师签字前不可拆除线路。

(6) 切断电源并拆除实验线路。

(7) 做好实验设备、实验台(桌、椅)及周围环境的清洁整理工作。

(8) 填写“设备使用记录”本并请老师签字后,经指导教师同意后离开实验室。

3. 编写实验报告

实验后按下述的格式和要求在规定的时间内完成实验报告,并在下次做实验前统一缴交。实验报告是学生平时成绩的重要依据。不交报告者不能参加下一次实验。

四、实验报告的要求和格式

1. 实验报告的要求

实验报告是实验工作过程的全面总结,也是工程技术报告的模拟训练。每次实验后均应认真完成实验报告。实验报告要求用简明的形式将实验的过程和结果完整、真实地表达出来。实验报告的基本要求是文理通顺、简明扼要、书写工整、图表规范、分析合理、讨论深入、结论正确。实验报告应采用规定的报告用纸,并用钢笔或圆珠笔认真填写实验名称、实验时间等栏目。

2. 实验报告的格式

实验报告中一般应包括下列各项:

- (1) 实验目的;
- (2) 实验原理;
- (3) 实验设备;
- (4) 实验过程及电路;
- (5) 数据图表及计算示例;
- (6) 实验结果的分析处理;
- (7) 注意事项;
- (8) 结论、收获体会及建议;
- (9) 回答思考题。
- (10) 报告封面的格式详见附录五。

五、实验过程中若干重要问题的说明

1. 设备的使用

(1) 实验前,要查看“设备使用记录”本,检查仪器设备的完好情况,发现问题应及时报告指导教师。

(2) 使用实验设备前,要仔细阅读使用说明书,注意听指导老师的示范和讲解,掌握其操作方法和注意事项,不明操作方法不得动手。

(3) 看清设备的种类和用途,如不能将直流仪表用于测量交流电量,反之亦然。

- (4) 设备的工作电压、电流不能超过额定值。
- (5) 将设备、元件的参数调整到实验所需值。恰当地选择仪表的量程。
- (6) 如果使用指针式仪表,应首先调整好仪表的指示零点。测直流参数时,注意极性的选择。
- (7) 实验时,设备和器材要布局合理,其原则是安全、方便、整齐、防止相互影响,同时应兼顾连线的合理性。

2. 实验线路的连接

(1) 要按合理的步骤连接线路,一般做法是“先串(联)后并(联)”,“先主(回路)后辅(助回路)”,最后连接电源线。预习过程中,最好设计好实际接线图,实验时照图连线。

(2) 养成良好的接线习惯,走线要合理。注意区分交、直流导线。导线的长短要合适,能用短线的地方不要用过长的导线。导线的连接不要过多地集中于某一点上,应适当予以分散。导线的连接点要牢靠,防止导线脱落。

(3) 电路中的每个接线柱上一般不要多于两个接线插头。

(4) 电源的正、负极(或火、地线)的引出线用红、黑色导线加以区分;三相交流电可使用三种颜色导线加以区分,中性线用黑色导线连接。

(5) 线路连接后要仔细复查,合闸前要排除连线错误。

3. 图表、曲线的绘制

(1) 原始记录纸上的实验线路和表格也需用作图工具绘制。

(2) 波形、曲线必须绘制在坐标纸上。注意比例要适当,各坐标轴须注明其所代表的物理量的符号和单位,还要标明各波形、曲线所对应电量的名称。

(3) 要求用曲线板绘制曲线,力求曲线光滑。

1-2 实验室安全用电常识

电力作为一种最基本的能源,是国民经济及广大人民现代日常生活不可或缺的。电本身看不见、摸不着,具有潜在的危险性。只有掌握了用电的基本规律,懂得了用电的基本常识,养成严格按照规程操作的良好习惯,电才能很好地为我们服务。否则,会造成意想不到的电气故障,导致人身触电,电气设备损坏,甚至引起重大火灾、事故等。轻则使人受伤,重则致人死亡。所以,必须高度重视用电安全问题。

一、实验室安全用电守则

为了保证安全用电,防止触电事故的发生,要求实验前应熟悉安全用电常识,实验过程中严格遵守安全用电规则 and 操作规程。

1. 进出本实验室,禁止穿拖鞋或赤脚,应注意行走路线和留意周边物品,不要拥挤和碰撞,避免滑倒、碰伤身体和损坏设备。

2. 实验前,要先熟悉安全用电规定,了解并掌握相关仪器设备的性能规格和使用方法,检查实验器材和设备状况,包括导线的绝缘情况,熟悉实验台总电源开关位置及操作方法,清点设备数量,发现问题应及时报告。

3. 实验时同组同学应注意协调配合,接通电源前要事先征得他人同意。如果有人正在接线或改线时,不得擅自接通电源,尤其是交流电的实验电路,必须通过检查确认无误后方可通

电实验。

4. 接线、拆线和改接线路须在断电下操作,即先接线再通电,先断电再拆线。在接线过程中,应尽量避免空甩线头的现象。多余不用的导线应拿开并整理好收入抽屉。

5. 在通电情况下,人体严禁触及电源和带电体,交流电实验时应严格遵循单手操作规范,杜绝双手带电操作。遇到漏电、触电和短路等危害情况,应立即断开实验台的总电源开关。

6. 实验过程中,若发现仪器和设备等异常情况时,如焦糊味、冒烟,甚至出现明火等,应立即断电,立即停止实验。

7. 发现人员触电,应立即切断电源,使触电者迅速脱离电源,报告教师处理。

二、实验室安全用电保护

1. 实验室用电电气保护

电工实验室提供有三相交流电源、单相交流电源和直流电源,它们通常都可以调节。实验台选用三相隔离变压器,将实验台上的用电与电网之间进行电气隔离。另外,实验室的用电大多还采用了多重的保护,一般有漏电保护、短路保护和接零保护。

(1) 漏电保护

漏电保护的基本功能是当人体触电或设备漏电短路时,在电流强度和时间尚未达到伤害程度前而自动切断电源,保护人身或设备安全。使用交流电源的场所,一般都安装有漏电保护器。当负载相线与地线之间发生漏电或由于人体接触相线而发生单相触电时,漏电保护器就自动跳闸而断开电源,对人身安全起到保护作用。

专业实验台通常采用电流型和电压型两种漏电保护器,对实验过程中的任何漏电或单相触电,都能够断开电源并且告警。实验中,若漏电保护器动作,应查明故障并排除后,再按下漏电保护器的复位按钮,使其恢复保护功能并接通电源。

(2) 短路保护

短路保护是利用线路电流增大到超过事先按最大负荷电流整定的数值时,引起动作的一种保护装置。实验室和工程设备通常采用熔断器做短路保护。使用熔断器应注意其额定电流与电路正常负载的正确配合,以免影响用电设备的正常工作。

(3) 接零保护

接零保护是把仪器设备的金属外壳与中性线相连的保护方式。在实验室采用的三相四线制中性点直接接地的供电方式中,电器设备采用“接零保护”后,当电器设备绝缘损坏或发生相线碰到设备外壳时,因为电器设备的金属外壳已直接接到低压电网中的零线上,所以故障电流经过接零导线与配电变压器零线构成闭合回路,碰壳故障变成了单相短路,而金属导线阻抗小,这一短路电流在瞬间增大,足以使保护装置跳闸或熔断器迅速熔断而切断漏电设备电源,即使人体触及了电器设备的外壳也不会发生触电现象。

2. 实验室电气灭火保护

(1) 电气火灾的产生原因

① 短路 由于某种原因造成电路的局部短路,使电流比正常值大若干倍,产生大量的热能而引起火灾。

② 过负荷 过负荷时,流过设备和导线的电流较大,当故障时间过长,产生和积累热量而引起火灾。

③ 接触电阻过大 电路中接触部分的连接不牢固,形成较大的接触电阻,电流流过时,该处的温度增加,当热量会使金属溶化,发出火花时,就会引起火灾。

④ 电气设备产生的火花和电弧 电气设备产生的火花和电弧极易引起周围易燃品的燃烧和爆炸,尤其是油库、乙炔站等高危场所。

⑤ 熔断器选用不当 熔断器选择过大,超过了导线的承受能力时,则线路在出现过载后有可能失去保护作用,而引起火灾。

(2) 电气火灾灭火知识

① 当发生电气火灾时,首先应尽快切断电源。若电气开关本身着火,或已处在火中,开关的绝缘有可能损坏,关闭时应使用绝缘工具。

② 关闭电源的操作,应从低压开始。首先关闭所有正在运行中的用电器(通过用电器的停止按钮进行),然后关闭负荷开关,切断高压电源的操作应先断开断路器,后断开断离开关。

③ 在无法切断电源时,带电灭火必须选择适当的灭火器。实验室均配备有二氧化碳、干粉等灭火器。也可用干燥的黄沙扑救,不允许用水和泡沫灭火器扑救。

1-3 测量的基本知识

一、基本概念及测量方法

1. 基本概念与测量单位

在测量过程中,人们借助专用设备,将测量得到的量与测量单位的量相比较,求出被测量的大小。测量的结果由两部分组成:数字值和测量单位的名称。

电量(包括电流、电压、功率、频率、相位、电阻、电容和电感等)测量仪表,不仅可以测量各种电量,而且通过相应变换器的转换,还可间接测量各种非电量(如温度、湿度、速度和压力等)。

电路测量中常用到的国际制单位见表 1-3-1。在实际测量中,有时单位显得太大或者太小,因此可在这些单位中加上表 1-3-2 中所示词冠,用以表示这些单位乘以 10 的正次幂或负次幂后所得到的辅助单位,如 $1\text{ A} = 10^3\text{ mA}$, $1\text{ }\mu\text{F} = 10^{-6}\text{ F}$ 。

表 1-3-1 电工测量常用的国际制单位

量	单位名称	代号	
		中文	国际
电流	安培	安	A
电压	伏特	伏	V
功率	瓦特	瓦	W
频率	赫兹	赫	Hz
电阻	欧姆	欧	Ω
电感	亨利	亨	H
电容	法拉	法	F
时间	秒	秒	S

表 1-3-2 单位前词冠的含义

词冠	代号		因数
	中文	国际	
吉咖(giga)	吉	G	10^9
兆(mega)	兆	M	10^6
千(kilo)	千	K	10^3
毫(milli)	毫	m	10^{-3}
微(micro)	微	μ	10^{-6}
纳诺(nano)	纳	n	10^{-9}
皮可(pico)	皮	p	10^{-12}

2. 测量方法

测量方法的分类有多种多样。其中可以归纳为:根据测量时被测量是否随时间变化的,分为静态测量和动态测量;根据测量条件的,可分为等精度测量和非等精度测量;根据测量探头是否接触被测物体的,可分为接触式测量和非接触式测量;根据测量方法可分为直接测量、间接测量和组合测量;根据测量方式(仪表)可分为直读式测量、零位式测量和微差式测量。下面重点讨论后两种分类。

(1) 测量方式

① 直接测量

将被测量与作为标准的量直接比较,或用标定好的测量仪表进行测量,不需要经过运算,就能直接得到被测量数值的测量方法称为直接测量。如使用电压表测量电路中电压,使用功率表测量电路的有功功率等。

② 间接测量

通过对被测量对应函数关系的量进行测量,然后根据其函数关系计算出被测量数值的测量方法称为间接测量。如测量出电路中的有功功率 P , 电压 U 和电流 I , 利用公式 $\cos\varphi = P/UI$ 计算出电路的功率因数;电路在线不能用欧姆表直接测量电阻,但可以测量该电阻上的压降和电流,根据欧姆定律 $R = U/I$, 计算出电阻值。

从上述两个例子可以看出,和直接测量法相比,间接测量法过程繁长,较为耗时,在实际工程测量中很少使用,多应用在实验室中。

③ 组合测量

利用直接测量和间接测量两种方法同时得到的数据基础上,通过联立求解各个函数方程,计算出被测数值。

(2) 测量仪表

① 直读测量

用直接显示被测量数值的仪表进行测量,能够直接在测量仪表上读取数值的测量方法称为直读测量法(直读法),测量仪表被称为直读式仪表。使用直读式仪表进行测量,读取电路中数值迅捷、方便,是电工实验中常用的仪表,如交直流电压表、电流表和功率表等。用直读法进行测量过程简单,操作方便,但由于仪表接入可能对电路参数产生影响以及仪表本身的原因,测量准确度不高。在一些要求比较高的场合,仪表要定期送专业部门进行校验。

② 比较测量

将测量结果与标准量进行比较后读出结果的测量仪表称为比较式仪表。使用比较式仪表测量要比直读式仪表测量过程复杂,一般比较式仪表的测量准确度要高些,常用于较为精确的测量中。如电桥、电位差计等均属于比较式仪表。

二、测量误差和仪器准确度

电工实验测量过程中,由于实验测量仪器的准确度有限,测量方法的不完善,实验条件的不稳定,实验操作者技术、经验等因素的影响,可使测量值与被测量的实际值(真值)不相同,只是近似值。这个测量所得的近似值与实际值之间的差值被称为测量误差,简称误差。

由于测量误差的存在,限制了测量的准确程度,因此在实验过程中,要尽量减少测量过程中所产生的误差,分析造成误差的原因,从正确选用测量仪表,到完善测量方法等途径来减少误差,并对误差范围做出估计。

1. 测量误差的来源与分类

(1) 测量误差的来源

① 仪器误差

这是由于测量仪器本身性能不完善及精度所限产生的误差。测量时仪器的指示值实际上是被测量的近似值,该误差为仪器所固有的,只能通过完善仪器性能,提高仪器精度来解决。

② 使用误差

又称操作误差。是由于在使用测量仪器的过程中,因为安装、调试和使用不当、不合理等所引起的误差,以及不同台仪器之间的误差。因此在使用仪器测量前,一定要熟悉仪器的性能要求和特点,掌握正确的操作方法。同时测量同一类数值时,应采用“一表制”来消除不同仪器之间的误差。

③ 人身误差

这是由于操作者的感觉器官和运动器官的限制所产生的误差。如今智能数字仪器的大量涌现,较好地解决这方面的误差。

④ 环境误差

它是因为在测量过程中受到环境的影响所产生的附加误差。比如测量现场的环境温度、电磁场强度、噪声和振动等,都可能对测量仪器产生影响。

⑤ 方法误差

又称理论误差。这是由于使用的测量方法不完善和测量所依据的理论本身的不严密所造成的误差。因此在较为复杂的测量过程实施前,应找到准确的理论依据,设计好测量流程。

(2) 测量误差的分类

① 系统误差

这是指在相同条件下重复测量同一量时,误差的大小和符号保持不变,或按照一定规律变化的误差。引起系统误差的原因有仪器、方法、人员和操作误差所引起的,其大小决定了测量的准确度。系统误差一般可以通过实验或分析方法,查明其变化规律及产生原因后,减少或消除误差。比如可以针对其变化规律,通过软件编程的方法加以补偿和修正。

② 随机误差

是指在相同条件下多次重复测量同一量时,误差的大小和符号无规律的产生变化,称为随机误差(又称偶然误差)。随机误差不能用实验方法消除,但从可以从随机误差的统计规律中了解它的分布特性,并对其大小及测量结果的可靠性作出估计,或将通过多次测量的数值,进行算术平均值来达到减小误差的目的。

③ 疏失误差

这是由于操作者对仪器性能的不了解、操作粗心,导致读数不准确而引起的误差,或测量条件的变化引起的误差。含有疏失误差的测量值称为坏值或异常值,必须根据统计检验方法的某些准则,去判断哪个测量值是坏值,然后去除。

在实际测量过程中,系统误差、随机误差和疏失误差之间的划分并不是绝对的,在一定条件下的系统误差,在另一条件下可能以随机误差的形式出现。比如,电源电压引起的误差,如考虑缓慢变化的平均效应,可视为系统误差,但考虑瞬时波动,就应视为随机误差。

2. 测量误差的表示方法

(1) 绝对误差

绝对误差也称为真误差,用公式表示为

$$\Delta X = X - X_0,$$

其中:

X ——被测量的测定值;

X_0 ——被测量的真值;

ΔX ——测量的绝对误差。

真值是客观存在的,但由于认识的局限性,使测定值只能无限接近真值。在实际测量中,常用直接上级计量检测标准测得的量值代表真值,称为实际真值。在实验室条件下,常用比被检查仪器的精度高 1 ~ 2 级的计量仪器的示值作为被检查仪器的实际真值。比如,实验室常用便携式电压表(数字万用表),可以用台式的标准电压校正电源进行标定。

在高准确度的仪器中,常给出校正曲线,当知道测定值 X 之后,通过校正曲线,便可以求出被测量值的实际真值。

(2) 相对误差

绝对误差不能确切地反映测量值的准确程度。比如测量 100 V 电压时绝对误差为 1 V;测量 10 V 电压时绝对误差也是 1 V,两次测量的绝对误差都是 1 V,但因为第一次测量的误差为 1%,而第二次测量误差为 10%,显然第一次测量的实际结果比较准确。这就是相对误差的概念。相对误差用符号 γ 表示,它的定义是:测量的绝对误差与其实际真值的比值,即:

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\%$$

相对误差通常用于衡量测量的准确性。相对误差越小,准确度就越高。

例 1-3-1 电路测量得到实际值为 50 mA 的电流,其仪器指示值为 50.5 mA;实际值为 10 mA 的电流,其仪器指示值为 9.7 mA。求两次测量的绝对误差和相对误差。

解 第一次测量时:

$$\Delta X_1 = X_1 - X_{01} = 50.5 - 50 = 0.5 \text{ mA}$$

$$\gamma_1 = \frac{\Delta X_1}{X_{01}} \times 100\% = \frac{0.5}{50} \times 100\% = 1\%$$

第二次测量时:

$$\Delta X_2 = X_2 - X_{02} = 9.7 - 10 = -0.3 \text{ mA}$$

$$\gamma_2 = \frac{\Delta X_2}{X_{02}} \times 100\% = \frac{-0.3}{10} \times 100\% = -3\%$$

以上结果可知:

① ΔX_1 为正值,说明测定值大于实际值; ΔX_2 为负值,说明测定值小于实际值。

② $|\Delta X_1| > |\Delta X_2|$, $|\gamma_1| < |\gamma_2|$,说明第二次测量的准确度小于第一次测量。

③ 绝对误差 ΔX 有单位,而相对误差 γ 没有单位。

3. 最大引用误差 γ_m 与仪表的准确度

(1) 最大引用误差 γ_m

最大引用误差是一种简化的相对误差的表现形式。考虑到仪表的测量范围不是一个点,而是一个量程,为了计算和划分准确度等级的方便,通常取仪表的测量上限(满刻度值 X_n) 作为分母,用整个量程中的最大绝对误差 ΔX_m 作为分子,由此得出最大引用误差的定义:

$$\gamma_m = \frac{\Delta X_m}{X_n} \times 100\%$$

(2) 电工仪表的准确度

电工仪表的准确度等级,分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 共七个等级。如果仪表为 α 级,则说明该仪表的最大引用误差 γ_m 不超过 $\pm \alpha\%$ 。

在测量过程中,根据仪表的准确度就可以估算出测量误差。设某仪表的满刻度值为 X_n ,测量值 X ,则仪表在该测量值的误差为:

$$\text{最大绝对误差} \quad \Delta X_m = X_n \times (\pm \alpha\%)$$

$$\text{最大相对误差} \quad \gamma_m = \frac{\Delta X_m}{X} = \frac{X_n}{X} \times (\pm \alpha\%)$$

(在实际测量中,常常使用仪表的测量值 X 代替真值 X_n 进行相对误差的近似计算。)

一般 $X < X_n$,故 X 越接近 X_n 时,其测量精度越高。这就是为什么使用这类仪表测量时,应尽可能使用仪表满刻度的 $2/3$ 量程以上的范围进行测量的原因。

例 1-3-2 用量程为 10 A,精度为 0.5 级的电流表测量 10 A 和 5 A 的电流,求测量可能产生的最大相对误差。

解 测量中可能产生的最大绝对误差:

$$\Delta X_m = X_n \times (\pm \alpha\%) = \pm 10 \times 0.5\% = \pm 0.05 \text{ A}$$

因而测量 10 A 电流时的最大相对误差:

$$\gamma_m = \frac{\Delta X_m}{X} \times 100\% = \pm \frac{0.05}{10} \times 100\% = \pm 0.5\%$$

而测量 5 A 电流时,则:

$$\gamma_m = \frac{\Delta X_m}{X} \times 100\% = \pm \frac{0.05}{5} \times 100\% = \pm 1\%$$

例 1-3-3 用量程为 100 V、准确度等级为 0.5 级和量程为 10 V、准确度等级为 2.5 级的两台电压表,分别测量 9 V 的电压。求两次测量时的最大绝对误差和最大相对误差。

解 用量程 100 V、0.5 级电压表测量时:

$$\Delta X_{m1} = X_{n1} \times (\pm \alpha_1\%) = 100 \times (\pm 0.5\%) = \pm 0.5 \text{ V}$$

$$\gamma_{m1} = \frac{\Delta X_{m1}}{X_1} \times 100\% = \pm \frac{0.05}{9} \times 100\% \approx \pm 6\%$$

用 10 V 量程、2.5 级电压表测量时:

$$\Delta X_{m2} = X_{n2} \times (\pm \alpha_2\%) = 10 \times (\pm 2.5\%) = \pm 0.25 \text{ V}$$

$$\gamma_{m2} = \frac{\Delta X_{m2}}{X_2} \times 100\% = \pm \frac{0.25}{9} \times 100\% \approx \pm 3\%$$

从以上两个例子可以发现测量值接近仪表显示满读时,测量结果误差最小,特别是在例 1-3-3 中,可见用大量程 $X_{n1} = 100 \text{ V}$,高精度 $\alpha_1 = 0.5$ 级的电压表测量 9 V 电压时,产生的相对误差 $\gamma_{m1} \approx \pm 6\%$,而用小量程 $X_{n2} = 10 \text{ V}$,低精度 $\alpha_2 = 2.5$ 级的电压表测量接近满刻度值的 9 V 电压时,产生的相对误差 $\gamma_{m2} \approx \pm 3\%$ 。

所以,使用电工仪表,为了提高测量的准确度,选择仪表量程比追求仪表精度更有效。而且仪表精度越高价格也就越贵,使用条件也更苛刻。一般 1.0 和 1.5 级的仪表已经能够满足通常的要求。

三、测量结果的误差分析和估算

电工实验离不开各种直接或间接的数值测量,在这过程中误差是不可能完全消除的,因此测量之后,应对测量结果进行准确度的估算和分析。对于误差估算,要抓主要方面:首先考虑的

是测量仪器、仪表的准确度,仪表量程引起的基本误差,还有由于仪表本身内阻与电路参数配合等引起的方法误差。对于随机误差,一般不进行估算。

1. 测量结果的误差分析

(1) 由测量仪器精度引起的基本误差

设仪器的精度为 α , 量程为 X_n , 则由仪器精度引起的基本误差为:

$$\text{最大绝对误差} \quad \Delta X_m = X_n \times (\pm \alpha \%)$$

$$\text{最大相对误差} \quad \gamma_m = \frac{X_n}{X} \times (\pm \alpha \%)$$

测量值 X 比量程 X_n 小的越多, 相对误差就越大。所以为了减少这类测量误差, 应尽可能使仪表工作在大于 $2/3$ 量程的位置。

为了保证测量结果尽可能的准确可靠, 国家标准规定, 对于一般电测量仪表, 主要有下面几方面要求:

- ① 足够的准确度。
- ② 示值变差要小。
- ③ 受外界影响小(好的抗干扰能力)。
- ④ 仪表本身消耗的功率要小。
- ⑤ 要具有适合于被测量的灵敏度。
- ⑥ 要有良好的读数装置。
- ⑦ 高的绝缘电阻、耐压能力和过载能力。

(2) 由于仪表内阻与电路参数配合不当引起的方法误差

由于测量方法的不完善, 所产生的误差称为方法误差。例如当采用伏安法间接测量电阻时, 因为实际的电流表内阻不为零, 实际的电压表内阻不是无穷大, 测量计算得出的电阻值就含有方法误差。下面通过实例来分析采用伏安法实际测量电阻时的方法误差。

在测量时电压表和电流表有两种接法, 如图 1-3-1(a)、(b) 所示, 以电压表在电路所处的位置分为表前法(图 a)、表后法(图 b)。

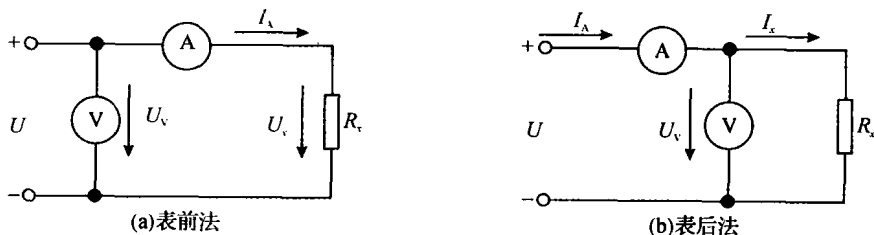


图 1-3-1 用伏安法测量电阻时仪表的两种接法

在图 1-3-1(a) 的测量电路中, 电压表的测量值为 U_v , 电流表的测量值为 I_A , 按欧姆定律可得, 被测电阻 R_x 的测量值 R'_x 为:

$$R'_x = \frac{U_v}{I_A} = R_A + R_x$$

式中: R'_x 是电流表内阻 R_A 与被测电阻实际值 R_x 之和, 所以方法误差为:

$$\gamma_A = \frac{R'_x - R_x}{R_x} = \frac{R_A}{R_x}$$