



“十三五”普通高等教育规划教材

DIANGONG CESHI JISHU

电工测试技术

李 平 湛海霞 主 编
王 晖 刘建新 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材

电工测试技术

主 编 李 平 湛海霞
副主编 王 晖 刘建新
编 写 李志勇 曾小勇 马 钧
主 审 汤放奇



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育规划教材。

本书淡化了电类与非电类专业的传统界限,将电路、电工技术、电气测量的实验融为一体。全书分为4章,主要内容有测量和误差的基本概念、电工测量仪表的基本知识以及直流电路实验、暂态电路分析实验、交流电路实验、EWB 仿真实验、PLC 电路实验等共二十八个实验。本书内容系统完整,既注重基本概念和理论介绍,又注重对学生实践技能的培养。

本书主要作为普通高等院校电类及非电类相关专业电路或电工理论课程的实验教材,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工测试技术 / 李平, 谌海霞主编. —北京: 中国电力出版社, 2016.3

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5123-8731-7

I. ①电… II. ①李… ②谌… III. ①电气测量—高等学校—教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 004498 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 3 月第一版 2016 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 8.25 印张 198 千字

定价 23.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

本书编写的宗旨是为了全面推进素质教育、实践教育和创新教育,提升大学生工程实践及创新创业能力,培养卓越工程师。

《电工测试技术》已作为校本教材在本校相关专业连续使用多年,教学效果良好。为持续保证本书的先进性、实用性和全面性,特组织长期工作在实践教学一线,具有丰富的教学和教研教改经验,熟悉教学需求的中、高级职称教师进行正式出版教材的编写。

本书作为单独设课的实验课程教材,淡化了电类与非电类专业的传统界限,将电路、电工技术、电气测量的实验融为一体,重在对学生的基本实验技能、基本设计思想和基本综合运用能力进行训练。在传统基本电路实验的基础上,增设了设计性、综合性实验,以加强对学生实践和创新能力的培养;改进了实验教学手段,通过增加部分虚拟实验(使用 Electronics Workbench 软件)实现硬件与软件的有机结合;增加了测试仪器仪表的使用、测量方式和方法,误差分析等内容,以提高学生分析问题和解决问题的能力。

本书由长沙理工大学电气与信息工程学院组织编写。其中,谌海霞编写第2章和实验一至七,刘建新编写实验八至十三,王晖编写第3章和实验十四至二十,其余部分由李平编写;马钧、李志勇、曾小勇参加部分内容的编写。本书由汤放奇教授主审,提出了许多宝贵的修改意见,在此谨致以诚挚的谢意。

限于编者水平,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2016年1月

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 开设本课程的目的及意义	1
1.2 本课程的学习方法及要求	1
第2章 电工测量的基本知识	7
2.1 测量与测量误差	7
2.2 电工测量的分类	13
第3章 常用测量仪器仪表的使用	15
3.1 电工测量指示仪表的一般知识	15
3.2 电工测量指示仪表的基本结构和工作原理	17
3.3 常用物理量的测量及相关电工仪表的使用	22
3.4 常用电子仪器的使用	25
第4章 电路实验项目	34
实验一 基本电工仪表的使用与测量误差的计算	34
实验二 基尔霍夫定律、叠加原理及故障分析	38
实验三 线性有源一端口等效参数测定及最大功率传输	41
实验四 受控源的实验研究	44
实验五 多量程电压表、电流表的设计	50
实验六 减小仪表测量误差的方法	52
实验七 电路元件伏安特性的测绘	56
实验八 示波器和信号发生器的使用	59
实验九 一阶 RC 电路过渡过程的研究	61
实验十 二阶电路研究	64
实验十一 交流参数的测定——三表法	67
实验十二 提高功率因数的研究	70
实验十三 R 、 L 、 C 串联谐振电路的研究	72
实验十四 互感电路的研究	75
实验十五 单相铁心变压器特性的测试	79
实验十六 三相电路电压、电流、功率的测量	82
实验十七 三相电源相序的判别及负载功率因数的测定	86
实验十八 三相电路无功功率的测量	88
实验十九 二端口网络参数的测定	92

实验二十	负阻抗变换器及回转器	96
实验二十一	单相电能表的使用与校验	102
实验二十二	电路的直流工作点分析和交流频率分析	105
实验二十三	电路的时域分析和傅里叶分析	108
实验二十四	一阶 RC 电路过渡过程分析 (虚拟实验)	112
实验二十五	三相异步电动机的正反转控制及 $Y-\Delta$ 起动控制	115
实验二十六	三相异步电动机制动控制	118
实验二十七	三相异步电动机正反转控制 (PLC 控制)	121
实验二十八	三相异步电动机 $Y-\Delta$ 换接起动控制 (PLC 控制)	124
参考文献		126

第1章 概述

1.1 开设本课程的目的及意义

“电工测试技术”是一门以电路理论为基础,以测试技术为指导的实验课程。该课程通过一系列基本实验技能的训练,使学生巩固和加深所学的电路理论知识,掌握基本的电气测试技术、实验方法以及数据分析处理知识;旨在培养学生运用电路基本理论分析和处理实际问题的能力,为后续专业课的学习以及今后从事电气工作打下坚实的基础。

随着知识经济时代的到来,我国已由工程教育大国迈向工程教育强国,国家提出走中国特色新型工业化道路。建设创新型国家,提升我国工程科技队伍的创新能力和国际竞争力,迫切需要培养一大批创新型工程人才;增强综合国力,应对经济全球化的挑战,迫切需要培养一大批具有国际竞争力的工程人才。这就对学生的工程实践能力、创新能力和国际竞争力提出了越来越高的要求。

学生毕业后要在社会上取得施展才华、获得成功的一席之地,单凭扎实的理论知识远远不够,还必须具备一定的工程实践能力和解决问题的能力,实验课程正是培养和获取这种能力的一个重要环节。通过严谨的科学实验和实践,深入探究理论原理及科学规律,能够培养学生求真务实的科学作风(提出问题、分析问题、解决问题),提高学生理论联系实际的知识运用能力,培养过硬的实践技能。

通过本课程的实践,可获得以下几方面的能力和素质的培养。

(1) 学习并掌握常用电子仪器、仪表:包括万用表、直流稳压电源、低频信号发生器、毫安表、毫伏表及电子示波器等性能、工作原理及使用方法。

(2) 学习并掌握基本的测量方法:包括电流与电压的测量,阻抗的测量,网络伏安特性的测量,网络频率的测量以及网络动态响应的测量等。

(3) 培养初步的实验技能:包括根据实验目的和任务制定合理的实验方案,设计正确的电路,正确选用仪器与仪表,观察和判断实验中各种现象,正确读取和处理实验数据,分析误差,得出实验结论,撰写实验报告,以及应用相关计算机辅助分析软件进行实验结果的分析等。

1.2 本课程的学习方法及要求

要学好本课程,必须掌握好的学习方法,养成良好的学习习惯,积极主动,才能达到好的实验效果。

1.2.1 学习方法

进行电工实验,必须经过实验预习、实验操作、实验总结等几个主要环节。

1. 实验课前预习

实验受时间和条件的限制,在规定时间内,学生能否顺利完成任务,达到实验目的与要

求,做好预习非常重要。

(1) 每次实验课前,要求认真阅读实验指导书。明确本次实验的目的、任务与要求,复习教材中有关内容,搞清楚实验原理和有关理论知识。

(2) 设计实验电路,制定出实验方案,拟定实验步骤;估算实验结果,做好相应的理论计算,对实验结果做到心中有数,以便在实验中能及时发现问题以保证实验结果的正确性;设计合适的实验数据表格。

(3) 对需要使用的仪器仪表和设备,要阅读使用说明书,掌握使用要领。

(4) 认真撰写预习报告。

2. 实验课中实践操作

实践操作的任务是将预定方案付诸实施的过程。良好的工作方法和操作程序是使实验顺利进行的有效保证。在此过程中,一是完成实验任务,二是锻炼动手能力,养成一个良好的实验习惯,积累实践经验,因此要勤于动手,乐于思考,善于发现问题、思考问题并解决问题。对于实验中出现的各种问题不要急于问老师寻求答案,而应该先通过自己的努力来解决问题。

另外还应该认识到,实验课上操作某一实验项目只是一种手段,而提高分析问题、解决问题的能力 and 临场应变能力以及培养创新精神才是本课程的真正目的。下面介绍实验课上的相关实践操作。

(1) 实验课开始时,应认真听取指导教师对实验的介绍。

(2) 编好实验小组,并指定小组长一人。

(3) 分组后应事先检查仪器设备是否齐全、完好,如发现问题应及时报告指导教师。接线前应熟悉实验设备、仪器和仪表,了解它们的性能、额定值和使用方法。

(4) 根据指导书或自行设计的方案,正确连接实验线路和仪器仪表。完成接线后,同学间应先做检查,然后请教师检查,经检查无误后方可通电进行实验。

(5) 实验时小组成员之间应进行分工,一人指挥测量和记录原始数据,另一人进行操作。如发现所测数据有疑问,应重新测量和讨论,分析其原因,直至得到正确结果。另外,为了使每个同学都受到实验技能的训练,在每做完一个实验内容后,记录者与操作者应调换分工。

(6) 实验过程中,不要只埋头读数和记录,应该注意是否出现异常现象。若出现异常现象,应首先断开电源,然后查找原因,待问题解决后再继续进行实验。

(7) 在数据测量完毕后,应断开电源,但不要急于拆除线路。首先检查数据有无遗漏,分析结果是否正确,然后送教师检查,经教师检查无误后方可拆线并整理。

3. 实验课后总结

实验报告是课后总结的主要体现形式。它是在实验的基础上,对实验现象和数据进行整理计算和总结分析;同时,它还是一个从感性认识到理论认识的提高过程,是一个加深理解和巩固理论知识的过程,并可促使同学们提高撰写实验报告或科技论文的能力。因此,必须重视并认真写好实验报告。

1.2.2 实验过程中的相关要求

1. 实验操作要求

为了做好实验,并确保人身和设备的安全,安全用电是实验中始终需要注意的重要的事项。在做电工实验时,必须严格遵守下列安全用电规则。

(1) 实验课前, 学生必须提前 5min 进入实验室, 检查所需实验设备, 做好实验前的准备工作。

(2) 开始做实验前, 首先要确定好实验电路所需电源的性质、极性、大小, 了解测试仪表的量程选择, 了解实验设备的铭牌数据等, 以免出现错误和损坏设备。

(3) 实验室内设备不准任意搬动和调换, 非本次实验所用仪器设备, 未经指导教师允许不得动用。

(4) 实验中的接线、改接、拆线都必须在切断电源(包括安全电压电源)的情况下进行, 线路连接完毕再送电。

(5) 实验时应精力集中, 同组者必须密切配合, 接通电源前必须通知同组同学, 以防发生触电事故。

(6) 在电路通电情况下, 人体严禁接触电路中不绝缘的金属导线和带电连接点。万一遇到触电事故, 应立即切断电源, 保证人身安全, 然后找指导教师和实验技术人员, 如实反映事故情况, 并分析原因和处理事故。如有仪表和设备损坏时, 应马上提出, 按有关规定处理。

(7) 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, 如发现有超量程、过热、异味、冒烟、火花等, 应立即断电, 并请指导教师检查。

(8) 每次实验结束, 实验数据和结果一定要经指导教师检查, 确认正确无误后方可拆线, 并整理好实验台, 搞好周围卫生, 填写实验登记簿, 然后离开实验室。

2. 预习报告要求

预习报告的功能有两个: 一是通过预习使实验者了解实验目的, 为本次实验制定出合理方案, 进入实验室后能按预习报告有条不紊地进行实验; 二是为实验后的总结提供原始资料。因此, 在预习时不能流于形式, 应严肃地对待每一项内容, 在认真考虑实验的每个环节、步骤后, 撰写出可行的、有实用价值的预习报告。力戒太笼统、太简单, 要具体完整, 突出其实用性、可操作性, 便于实验完成后与实验报告进行对比和总结。

预习报告的撰写应包含如下内容: 实验目的及内容、选用的仪器与设备、实验原理及实验电路、实验步骤及方法、注意事项、记录表格和疑点标记等。

对于设计型或综合型实验项目, 在提供预习报告的同时, 也可利用计算机辅助软件(如 PSpice、EWB、Matlab 等)进行仿真(原则上所有设计电路都可事先在计算机上进行仿真分析), 验证或优化自己的实验方案, 记录实验现象和测试数据。

3. 实验报告要求

实验后撰写实验报告, 是对实验工作的全面总结, 是一项有价值的工作。实验报告不能写成空洞的、宏观的总结, 或一些材料的简单罗列。实验报告要用简要的形式将实验结果完整而真实地表达出来。实验报告要求文理通顺, 简明扼要, 字迹端正, 图表清楚, 分析透彻, 结论合理, 讨论深刻。

撰写实验报告的主要工作:

(1) 实验数据的处理。此时要充分发挥曲线和图表的作用, 其中的公式、图表、曲线应有符号、编号、标题、名称等说明, 以保证叙述条理的清晰。绘制曲线必须用坐标纸, 曲线名称、坐标分度及单位要完整。

(2) 实验结论的表达。实验结论的表达方式应明了有效, 可读性强, 可信度高。它是实

验的成果,因此结论必须有科学的根据和来自理论及实验的分析。

(3) 保留原始数据。为了保证整理后的数据的可信度,实验报告中必须保留原始记录数据。

(4) 实验中发现的其他问题及心得。实验报告还应包括实验中发现的问题、现象及事故的分析、实验的收获及心得体会等。

(5) 回答思考问题。实验报告中应回答思考问题。

1.2.3 实验过程中的相关注意事项

1. 人身安全和设备安全

要求切实遵守实验室的各种安全操作规程,以确保实验过程的安全。严格遵守“先接线后合电源,先关电源后拆线”的操作规程。发现异常现象(声响、发热、焦臭等)应立即断开电源,保护现场,报告指导老师。造成仪器设备损坏者,应如实填写事故报告单。

2. 合理连接线路

(1) 注意正确选择仪表类型、参数及容量,尽可能减小测量仪表对被测线路工作状态的影响。

(2) 按照“先串后并”、“先分后合”或“先主后辅”的原则合理搭接线路,弄清楚电路图上接点与实验电路中各元件接头之间的对应关系。

(3) 导线长短粗细选择应适当,接线不宜过于集中于某一点,接线松紧要适当。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。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)色导线接中性线。

(4) 仔细检查线路,同学之间应相互审查,然后找指导教师复查确认,方可合闸供电进行实验。

3. 操作、观察、读数和记录工作的协调

注意同组人员之间的分工配合,操作前要做到心中有数,目的明确。操作时要做到手合电源,眼观全局,先看现象,再读数据。实验中应随时监控,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、功率等额定值。读数前要弄清仪表量程及刻度,读数时注意姿势正确,要求“眼、针、影成一线”。对于数字仪表应在显示数据稳定时读取数据。记录要求完整清晰,尽量图示化、表格化,一目了然。合理取舍有效数字(最后一位为估计数字)。

实验数据必须记在规定格式的“原始记录纸”上,要尊重原始记录,不得随意涂改。交报告时须将“原始记录纸”一并附上。

1.2.4 安全用电知识

1. 实验室供电系统介绍

在实验室中要用到各种各样的电子仪器或测量设备,它们本身都要接动力电源才能工作。平时,它们的电源插头直接插在移动式的多位插座板上或实验桌的固定电源板上。因此,实验前了解实验室的供电系统及一些安全用电常识是很必要的。

在实验室中采用的动力电源通常是线电压 380V、相电压 220V, 50Hz 的三相四线交流电,也就是三条相线、一条中性线、一条保护地线,如图 1-1 所示。当三相电源的中性点和负载侧的中性点连接在一起就构成了电源系统的中性线(俗称零线),其对地电压为 0,一般用于低压三相供电系统。中性线实际上形成了各相电流的公共回路。中性线的作用是当用电系统的设备某一相绝缘损坏而与设备外壳相通时,该相就可以通过机壳和中性线形成单相短路。因而,三相电路中的自动开关或熔断器能迅速断电,消除危险,确保人身安全。

交流电源 220V（即相电压）从配电盘（板）分别引至各实验台电源接线盒（板）上，电源接线盒（板）上有两孔插座或三孔插座供用电器使用。按照电工操作规程规定，两孔插座与动力电源的连接是左孔接中性（零）线，右孔接相（火）线，即“左零右火”；三孔插座除了按“左零右火”连接之外，中间孔接的是保护地线（GND）。同时，为了满足需要使用三相电源的要求，有时把三根相线、中性线和保护地线同时引至实验台固定电源板的接线柱上，并用三相开关控制其通断。

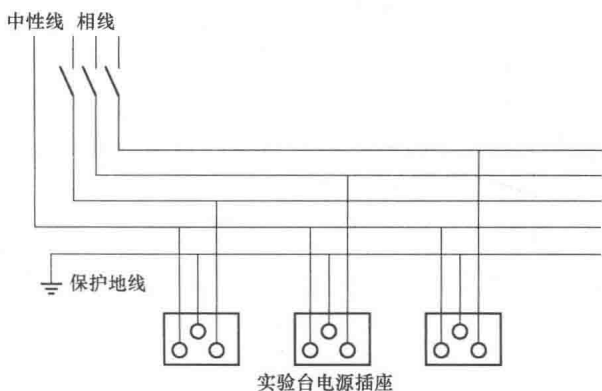


图 1-1 实验室供电线路

2. 中性线与保护地线的区别

虽然中性线与保护地线都是与大地相接的（此处的中性线专指 380V 低压系统的中性线），可它们之间有着本质的区别。

（1）接地的地点各不相同。中性线是针对动力电源而言，也就是在低压配电室的配电变压器的中性点处接地；而保护地线则是在实验室中对于电子仪器而言的。

（2）是否存在电流。中性线在三相动力电源供电系统中是有电流的，其电流是三条相线的电流相量和，但是其电压是对地而言的，为 0；保护地线是没有电流、电压的。

（3）是否构成回路。中性线在三相动力电源供电系统中与负载构成回路，而保护地线没有构成回路。

3. 安全用电

在日常生活中，高电压、高电流会对人、仪器产生危害，这是众所周知的。其实在实验室中进行实验时，除了动力电以外，低电压、低电流也会对人及仪器设备产生伤害，因此在进行实验之前，必须了解实验室中安全用电常识，确保人身和设备安全。

（1）人身安全。人体触电有电击和电伤两种。电击就是通常所说的触电，是电流通过人体所造成的内伤。电流大小不同，使人体肌肉抽搐、内部组织损伤、发热等的程度也不同，严重的会引起窒息、心脏停止跳动而致死亡。电伤则是由电流的热效应、化学效应、机械效应，以及电流本身作用所造成的人体外伤，表现为灼伤、烙伤和皮肤金属化等现象。通过人体电流的大小一般与触电电压和人体电阻有关。人体电阻不仅与身体自然状况和人体部位有关，而且还与环境条件等因素以及接触电压有很大的关系。通常人体电阻可按 $1000 \sim 2000 \Omega$ 考虑，人体电阻越大，受电流伤害越轻。细嫩潮湿的皮肤，电阻可降至 800Ω 以下。接触的电压升高时，人体电阻会大幅度下降。

当电压低于某一定值后，就不会造成触电。这种不带任何防护设备，对人体各部分组织均不造成伤害的电压值，称为安全电压。世界各国对于安全电压的规定不尽相同。我国规定 12、24、36V 三个电压等级为安全电压级别，不同场所选用的安全电压等级不同。

（2）设备安全。每次实验前，首先应对仪器的测试线、仪表插头等进行认真仔细的检查，看其是否有异常的松动、损伤，因为实验室所用动力电源是 220V、50Hz 的交流电，当人体不慎接触到这些带电插头、测试线头时，等于直接与动力电源的相线接触，会被电击而产生

伤害；其次在不能确定被测电量的大小范围时，请将仪表量程置于最大量程的位置，因为若测量电量太大而超过测量量程，有可能损坏仪表或伤害人身安全；另外，如需更换仪器的熔断器或电池，需注意熔丝和电池的型号匹配和参数要求。在仪器设备停止使用或实验过程中更换仪器时，都需切断总电源，以避免带电工作而遭受电击。

1.2.5 故障排除方法

在实验过程中有时会出现各种故障，面对故障，不要知难而返，而应积极思考分析，及时予以排除，以保证实验的顺利进行。有效分析和排除故障既能提高学生分析问题和解决问题的能力，又能节省时间和提高实验效率。

1. 故障产生的原因

(1) 仪器设备。仪器自身工作状态不稳定或损坏；超出了仪器的正常工作范围，或调错了仪器旋钮的位置；测量线损坏或接触不良（虚连接或内部断线）；仪器旋钮由于松动，偏离了正常的位置。

(2) 器件与连接。用错了器件或选错了标称值；连线出错，导致原电路的拓扑结构发生改变；连接线接触不良或损坏；在同一个测量系统中有多点接地，或随意改变了接地位置；实验线路布局不合理，电路内部产生干扰。

(3) 错误操作。未严格按照操作规程使用仪器。如读取数据前没有先检查零点或零基线是否准确，读数的姿势、表针的位置、量程不正确等；片面理解问题，盲目地改变了电路结构，未考虑电路结构的改变会对测量结果带来的影响和后果；采用不正确的测量方法，选用了不该选用的仪器。

2. 故障检测的基本方法

在电路实验中，查找故障的方法，一般应遵循“先易后难”的原则，根据故障原因，逐步缩小范围。

(1) 通电检查法。在接通电源的情况下，用万用表的电压挡或电压表，根据电路工作原理，对每个元件及连线逐一进行检查，根据被检查点电压的大小找出故障点。如果电路某两点应该有电压，电压表测不出电压，或某两点不应该有电压，而电压表测出了电压，或所测电压值与电路原理不符，则故障必然出现在此两点间。在“对每个元件及连线逐一进行检查”时，一般顺序为：①检查电路连线是否接错；②检查电源供电系统，从电源进线、刀开关、熔断器到电路输入端子有无电压，是否符合给定值等；③检查电路中各元件及测量仪器之间连接是否牢固可靠，导线是否良好；④检查测量仪器仪表是否供电，输入、输出是否正常，量程、衰减、显示等是否正确，测试线及接地线是否完好等。

(2) 断电检查法。在断开电源的情况下，用万用表的电阻挡，根据电路工作原理，如果电路某两点应该导通而无电阻（或电阻极小），万用表测出开路（或电阻极大），或某两点应该开路（或电阻很大），而测得的结果为短路（或电阻极小），则故障必然出现在此两点间。

第2章 电工测量的基本知识

2.1 测量与测量误差

测量是通过试验方法对可观测事物取得数量概念的过程。在测量中,无论所用测量器具如何精密,测量方法如何完善,所得测量结果都不能完全与被测量的实际值一致,会出现测量误差。测量误差常常会歪曲某些客观现象。研究测量误差,就是研究产生误差的原因、性质和如何正确处理测量结果,以便消除、修正或减弱误差的影响。掌握测量误差的来源和变化规律,可以正确地组织实验,合理地选定测量方法,从而有效地减小误差,提高实验质量。

2.1.1 电工测量的概念

电工测量是指以电工技术理论为依据,借助各种电工仪表对电压、电流、功率等各种电量、磁量进行测量,以确定被测电量、磁量的值。

测量对象、测量设备和测量方法是测量过程的三要素。测量时应根据测量对象的要求确定测量设备和测量方法。

电工测量主要包括如下内容:

- (1) 电量的测量,包括电流、电压(电位)和功率等。
- (2) 电信号特性的测量,包括频率、周期、相位、幅度等。
- (3) 电路元器件参数的测量,包括电阻、电感、电容、互感量、双口网络参数等。
- (4) 电路性能的测量,包括电压源、电流源的伏安特性,无源单口网络等效阻抗,无源、有源单口网络的伏安特性、频率特性、电路响应等。
- (5) 电路定理的验证,包括欧姆定律、KCL、KVL、叠加原理、戴维南定理、诺顿定理等。
- (6) 各种非电量通过传感器转化为电量后的测量,包括温度、位移、压力、质量等。

2.1.2 测量误差的分类

测量所得的数值与被测量真值之间的差值称为测量误差。

测量误差根据其性质和特点可分为系统误差、偶然误差和疏失误差三类。

(1) 系统误差。在一定条件下,对同一个对象进行测量时,如出现的误差的大小与正负恒定不变或遵循某一规律,这种测量误差属于系统误差。

产生系统误差的原因有:基本误差,即仪器仪表误差(刻度的偏差、仪表的零点偏移或指针安装偏心等),环境误差(测量时环境实际温度、湿度及其他外界干扰等引起的误差),读数误差(读数者的习惯或不正确的读数方法),测量方法误差(近似测量方法以及在间接测量时近似计算方法引起的误差)等。

(2) 偶然误差。同一个实验者,用同一台仪器在相同条件下对同一个事物量进行多次等精度测量时,发现每次测量结果都不尽相同,可见每次测量都有误差,这种误差称为偶然误差,也称为随机误差,即误差的大小随机改变而无法控制。

产生偶然误差的原因有:测量用的仪器仪表之间的配合不符合要求,测量人员读数无规

律, 电源电压的频繁波动, 电磁场干扰等。

(3) 疏失误差。由于疏忽引起的测量值明显地偏离实际值所造成的误差称为疏失误差。将含有疏失误差的测量值称为坏值或异常值。在实验测量过程中或数据处理时应尽量剔除这些坏值。

产生疏失误差的原因有: 不恰当的测量方法, 测量者粗心大意等。

2.1.3 误差的表示方法和准确度

1. 误差的表示方法

指示式仪表的误差表示方法有绝对误差、相对误差、引用误差三种。

(1) 绝对误差。绝对误差是测量结果 (A_x) 与被测量真值 (A_0) 之间的差值。绝对误差 Δ 为

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (2-1)$$

真值一般无法求得。在实际应用中, 可用标准表的指示值作为被测量的真值。当 $A_x > A_0$ 时, Δ 为正值; 当 $A_x < A_0$ 时, Δ 为负值, 所以绝对误差是具有大小、正负的数值。它的大小和正负分别表示测量值偏离真值的程度和方向。

【例 2.1】 用一只标准电压表校准两只电压表。用标准电压表测量电路中某一电阻上的电压为 80V, 而用电压表 1 和 2 测量时, 读数分别为 80.5V 和 79V, 求两表的绝对误差。

解 由式 (2-1) 得电压表 1 的绝对误差为

$$\Delta_1 = A_{x1} - A_0 = 80.5 - 80 = 0.5 \text{ (V)}$$

$$\Delta_2 = A_{x2} - A_0 = 79 - 80 = -1 \text{ (V)}$$

从两表的绝对误差可知, 电压表 1 的测量比电压表 2 的要准确。

(2) 相对误差。测量不同大小的被测量时, 不能简单地用绝对误差来判断其准确程度。例如用 [例 2.1] 中电压表 1 测量真值为 10V 的电压时, 读数为 10.5V, 绝对误差 $\Delta_1 = 0.5\text{V}$; 用电压表 2 测量真值为 100V 的电压时, 测量值为 99V, 绝对误差为 $\Delta_2 = -1\text{V}$ 。从绝对误差的大小来看, 电压表 2 的值大于电压表 1。但从仪表测量结果的相对影响来看, 却是电压表 1 对结果影响较大。因为电压表 1 的误差占被测量值的 5%, 而电压表 2 的误差却只占被测量值的 1%。所以绝对误差的表示方法有它的不足之处, 它往往不能确切地反映测量质量, 因而工程上通常采用相对误差来衡量测量结果的准确度。

相对误差 (r) 是绝对误差与真值的比值, 通常用百分数来表示, 即

$$r = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (2-2)$$

通常, 真值并不知道, 故用测量值来近似替代, 有

$$r \approx \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (2-3)$$

(3) 引用误差。相对误差可以较好地反映测量的准确度, 但不能说明仪表本身的准确性。在连续刻度的仪表中, 用相对误差来表示在整个量程内的准确度就不太适合, 因为对不同的被测量, 同一仪表的绝对误差相差不大, 而根据式 (2-3) 可知, 不同被测量 A_x 就具有不同的相对误差。

引用误差 (满刻度相对误差) 是指绝对误差 Δ 与仪表测量上限 A_m (仪表的满刻度值) 比值的百分数, 用 r_m 表示为

$$r_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (2-4)$$

因仪表的测量上限是一个常数，而仪表的绝对误差又基本上不变，对某一个仪表而言，引用误差就近似为一个常数。因而可用引用误差来表示仪表的准确度。引用误差事实上就是测量值为仪表最大测量上限时的相对误差。

2. 准确度

测量准确度是测量结果中系统误差和随机误差的综合，表示测量结果与真值之间一致的程度。测量值与真实值接近的程度称为准确度。

最大引用误差：绝对误差的最大值 Δ_m 与仪表测量上限 A_m 之比的百分数称为最大引用误差，表示为

$$r_m = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \quad (2-5)$$

它表示仪表标度尺的工作部分全部刻度上可能出现的最大基本误差的百分数值。

国家规定把仪表的最大引用误差划分为若干个级别，称为仪表的准确度等级，用 K 表示，即有

$$\pm K\% = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \quad (2-6)$$

因此，仪表的准确度等级的百分数也就是表示该仪表在规定的正常工作条件下使用时所允许的最大相对额定误差。

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 7 级。对于量程相同的同类仪表而言，仪表的准确度等级越小，仪表测量越准确。

【例 2.2】 要测量一个真值为 20V 的电压，有准确度为 1.0 级、量程为 100V 和准确度为 1.5 级、量程为 30V 的甲、乙两只电压表，试问选用哪只电压表最合适？

解 由式 (2-6) 可知：

准确度为 1.0 级、量程为 100V 的甲表，测量绝对误差为 $\pm 1.0V$ ，则真值为 20V 的电压测量值为 $20 \pm 1.0V$ ；而准确度为 1.5 级、量程为 30V 的乙表，测量绝对误差为 $\pm 0.45V$ ，则真值为 20V 的电压测量值为 $20 \pm 0.45V$ 。

从分析结果可知，尽管甲表的准确度等级高于乙表，但由于甲表量程比乙表量程大许多，导致测量 20V 电压时甲表绝对误差高于乙表，因此应选乙表测量。

为了充分利用仪表的准确度，在选择仪表的量限时，应选择使指针指示在仪表量程的一半以上，越接近满量程越好。

2.1.4 测量误差的消除

消除或尽量减少测量误差是进行准确测量的条件之一，所以在进行测量之前，必须预先估计所有产生误差的根源，有针对性地采取相应的措施加以处理，就能更加接近被测量的真值。

1. 系统误差的消除

(1) 修正误差。在测量之前，应对测量所用仪器和仪表用更高一级标准仪器进行检定，从而确定它们的修正值，则实际值 = 修正值 + 测量值，通过修正值消除仪表误差。

(2) 消除误差来源。测量之前，测量者应对整个测量过程及测量装置进行必要的分析与

研究,找出可能产生系统误差的原因,在测量之前对产生误差的因素采取一些必要的措施使这些因素得到消除或削弱,如对仪表进行校正,配置适当的仪器仪表,选择合理的测量方法等。

2. 偶然误差的消除

偶然误差的特点是在多次测量中,误差绝对值的波动有一定的界限,正负误差出现的机会相同。根据统计学的知识分析可知,当测量次数足够多时,偶然误差的算术平均值趋向于零。因此,取多次测量值的平均值的方法可以用来消除偶然误差。

3. 疏失误差的消除

凡是由于偶然疏忽所造成的疏失误差,数据会明显地与实际值相差甚远,这种由于疏忽所测得的数据均为坏值,在进行数据处理时应将其剔除。

综上所述,三种误差同时存在的情况下,对于确认为疏失误差的测量值,首先给予剔除;对于偶然误差采用统计学求平均值的方法来削弱它的影响;对于系统误差,在进行测量之前,必须预先估计一切产生系统误差的根源,有针对性地采取相应的措施来消除系统误差。

2.1.5 测量数据的读取与处理

实验中,要对所测量的量进行记录,取得实验数据,将记录下来的数据经过适当的处理和计算从而反映出事物的内在规律,这种处理过程称为测量数据处理。数据处理是电工测量中必不可少的工作。测量中如何正确读取整理数据,制定出合理的数据处理方法,对数据进行分析 and 计算,按照技术标准作出正确判断,这是测量人员必须掌握的基础知识。

1. 测量数据的读取

(1) 指针式仪表测量数据的读取。指针式仪表的指示值称为直接读数,是指针所指出的标尺值,通常是用格数表示的。直接读取的指针式仪表的数值,一般不是被测量的测量值,需要换算才可得到测量结果。

使用仪表之前,应使仪表的指针指到零的位置,如果指针不在零的位置时,调节调零旋钮使指针指到零的位置。

指针式仪表在读数时,应使视线与仪表标尺平面垂直,如果表盘平面上带有平面镜,读数时应使指针与其镜像重合,并读取足够的位数,以减小和消除视觉误差,提高读数的准确性。为减少测量误差,一般应采取多次测量取平均值。

指针式仪表测量数据的读取要注意以下几方面问题:

1) 读数的有效数字位数。测量时应首先记录仪表指针读数的格数。例如选用额定电压为 300V,额定电流为 1A,具有 150 分格的功率表测量功率,当指针指在 75~76 格之间时,选择读数为 75.5 格,有效数字位数分别为 3 位。

2) 仪表的仪表常数。指针式仪表的标度尺每分格所代表的被测量的大小称为仪表常数,也称为分格常数,用 C_{α} 表示,其计算式为

$$C_{\alpha} = \frac{x_m}{\alpha_m} \quad (2-7)$$

式中: x_m 为选择的仪表量程; α_m 为指针式仪表满刻度格数。

对于同一仪表,选择的量程不同则分格常数也不同。

3) 测量数据的示值。测量数据的示值是指仪表的读数对应的被测量的测量值,示值的有效数字的位数应与读数的有效数字的位数一致。

(2) 数字式仪表测量数据的读取。数字式仪表的读出数值无需换算即可作为测量结果的

读取数据。但是测量时,数字式仪表量程选择不当,会丢失有效数字。因此,在实际测量时,应注意合理地选择数字式仪表的量程,使被测量值小于并接近于所选择的量程,而不可选择过大的量程。

(3) 测量结果的正确填写。在电路实验时,最终的测量结果通常由测量值和仪表在相应量程时的最大绝对误差共同表示。例如,在用电压表测量电压时,如果一只电压表的准确度等级为0.3级,其量程为150V,则该表的最大绝对误差为

$$\Delta U_m = \pm K\% \cdot U_m = \pm 0.3\% \times 150 = \pm 0.45 \text{ (V)}$$

实验测量中,采用的是进位方法,误差的有效数字一般只取一位,即只要有效数字后面应予舍弃的数字是1~9中的任何一个时都应进一位,这样 ΔU_m 应取为 $\pm 0.5\text{V}$ 。如果该电压表为具有150分格的电压表,测量某电压时,指针读数为18.6格,电压表的量程为150V,则分格常数为1V,应记录的电压测量结果为

$$U = 18.6 \pm 0.5 \text{ V}$$

注意,在测量结果的最后表示中,测得值的有效数字的位数取决于测量结果的误差,即测量值的有效数字的末位数与测量误差的末位数是同一个数位。

2. 测量结果的数据处理和数据的表示方法

实验中,被记录下来的一些数据还需要经过适当的处理和计算才能反映出事物的内在规律,这种处理过程称为测量数据处理。测量数据处理是建立在误差分析的基础上。因此,应制定出合理的数据处理方法,以减少测量过程中偶然误差的影响。

(1) 数据的处理。数据处理是将实验中获得的原始测量数据,通过运算、分析后进行处理得出结论,而不是根据需要的结论去处理数据。由于数据采集的方法、方式不同,运算方法和实验者的经验不同,数据处理的结果差别较大。因此,要针对不同情况并通过回忆操作现场的情况进行分析处理,做出合理的评估,给出切合实际的结论。

1) 数据的排列。为了便于分析、计算,通常将原始测量数据按一定的顺序排列,譬如将原始数据按从小到大或按照时间顺序进行排列等。当数据量较大时,这种排序工作最好由计算机完成。

2) 坏值的剔除。在测量数据中,有时会出现偏差较大的测量值,这种数据称为离群值。离群值可分为两类:一类是因为随机误差过大而超过了给定的误差界限,属于坏值,应予以剔除;另一类也是因为产生的随机误差较大,但未超过规定的误差界限,这类测量值属于极值,应予保留。

在很多情况下,仅凭直观判断通常难以对坏值、极值和正常分布的较大误差作出正确判别,这时可采用统计检验的方法,比如利用拉依塔准则或格布罗斯准则等,来判别测量数据中的异常数据。

3) 数据的补充。在测量数据的处理过程中,有时会遇到缺损的数据,或者需要知道测量范围内未测出的中间数值,这时可采用线性插值法、一元拉格朗日插值法和牛顿插值法等方法来补充这些数据。

4) 有效数字的处理。在测量中,对于多余有效数字的处理原则是:当被舍去的多余有效数字大于5,则采用5进1;当被舍去的多余有效数字小于5,则只舍去而不进;当被舍去的多余有效数字等于5,而5之后的数字不为0,则同样采用舍5进1;当被舍去的多余有效数字等于5,而5之后的数字全部都为0,如若5前面为偶数,则只舍不进,如若5前面为奇数,