



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

电工电子基础

Electrical Engineering and Electronics Experiment Course

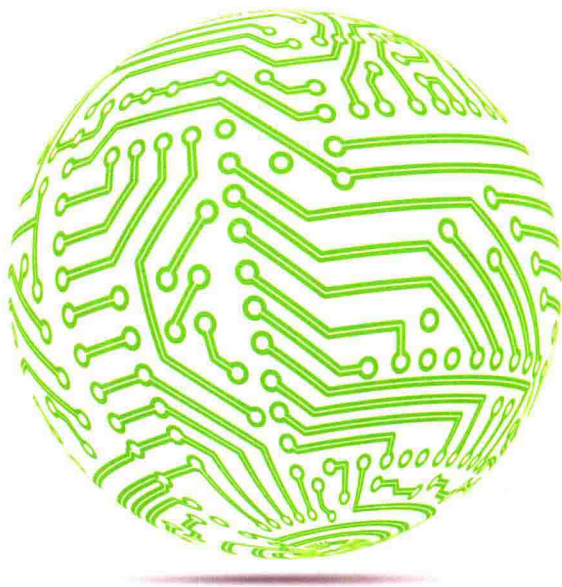
电工电子技术 实验教程

李艳玲 冯宇 马秋明 编著

Li Yanling

Feng Yu

Ma Qiuming



清华大学出版社



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

Electrical Engineering and Electronics Experiment Course

电工电子技术实验教程

李艳玲 冯宇 马秋明 编著

Li Yanling

Feng Yu

Ma Qiuming

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是为高等工科院校非电类专业开设电工电子技术实验课而编写的实验教材,包括三类实验即电工技术实验、模拟电子技术实验和数字电子技术实验,共 25 个实验项目,分为验证性、设计性和综合性三种实验类型,可根据不同的教学要求和实验室条件选择合适的实验。所有实验均先通过计算机仿真再进行实际硬件操作,实现了软件仿真与硬件电路设计的完美结合。故障排查是书中的一大亮点,通过故障排查可增强学生独立思考、分析问题及解决问题的能力。

本书适用于高等工科院校非电类各专业的“电工电子技术实验”教学,也可用于高专高职院校的相关专业实验教学。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术实验教程/李艳玲,冯宇,马秋明编著. —北京:清华大学出版社,2017

(高等学校电子信息类专业系列教材)

ISBN 978-7-302-45894-4

I. ①电… II. ①李… ②冯… ③马… III. ①电工技术—高等学校—教材 ②电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM ②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 003375 号

责任编辑:盛东亮 赵晓宁

封面设计:李召霞

责任校对:时翠兰

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:10.5 字 数:254 千字

版 次:2017 年 5 月第 1 版 印 次:2017 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:29.80 元

产品编号:069234-01

高等学校电子信息类专业系列教材

顾问委员会

谈振辉	北京交通大学（教指委高级顾问）	郁道银	天津大学（教指委高级顾问）
廖延彪	清华大学（特约高级顾问）	胡广书	清华大学（特约高级顾问）
华成英	清华大学（国家级教学名师）	于洪珍	中国矿业大学（国家级教学名师）
彭启琮	电子科技大学（国家级教学名师）	孙肖子	西安电子科技大学（国家级教学名师）
邹逢兴	国防科学技术大学（国家级教学名师）	严国萍	华中科技大学（国家级教学名师）

编审委员会

主 任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘 旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委 员	王志华	清华大学	宋 梅	北京邮电大学
	韩 焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪 伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾 云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢 泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学
	吴 瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李 晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡 毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江 毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	张伟刚	南开大学
	刘铁根	天津大学	宋 峰	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	靳 伟	香港理工大学
	苑立波	哈尔滨工程大学		
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

前言

PREFACE

“电工电子技术实验”是高等工科院校非电类各专业共同开设的一门重要的技术基础实验课,本教材是根据电工电子技术实验教学大纲的基本要求,并结合电工电子实验教学中心多年的实验教学经验和现有的实验设备条件编写的非电类专业实验教材,目的是帮助学生巩固和深化已学理论知识,加强基本实验技能训练,使学生具备简单电路的设计能力,掌握科学研究的基本方法,并培养学生的综合素质和创新能力。

全书共分为四部分:第一部分介绍电工电子技术实验基础知识;第二部分介绍电工技术实验;第三部分介绍模拟电子技术实验;第四部分介绍数字电子技术实验。在内容编排上,本书做到了以下几点:

(1) 实验项目覆盖面广,取材新颖、合理,涵盖了基础性实验、设计性实验和综合性实验三个层次的实验内容;

(2) 每一个实验都有思考题和故障排查部分,帮助增强学生独立思考,分析问题和解决问题的能力;

(3) 所有实验均先通过计算机仿真再进行实际硬件操作,这样不仅可以极大提高实验质量,还可以提高学生的计算机应用能力和工程实践能力。

本书由李艳玲(主要编写第1章和第4章)、冯宇(主要编写第2章)和马秋明(主要编写第1章和第3章)主编,张玉玲、丁宏、黎翠凤、刘姝延、邱相艳、冯树林和徐明铭参加编写。

在编写过程中,我们得到了电工电子教研室和实验室全体老师的大力支持,同时参考了部分兄弟院校的实验教材和资料,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请各位读者批评指正。

编 者

2017年1月

目录

CONTENTS

第 1 章 电工电子技术实验基础知识	1
1.1 实验目的和意义	1
1.2 实验的基本过程	1
1.2.1 课前预习	1
1.2.2 课中实验	1
1.2.3 实验后的总结	2
1.3 安全用电常识	3
1.3.1 触电的基本知识	3
1.3.2 实验室安全用电规则	3
1.3.3 仪器设备及器件安全	4
1.3.4 触电急救知识	4
1.4 测量误差和测量数据的处理	5
1.4.1 测量误差的分类	5
1.4.2 减小或消除测量误差的方法	6
1.4.3 测量误差的表示方法	7
1.4.4 测量数据的处理	9
1.5 常用电子仪器的使用	12
1.5.1 数字万用表	12
1.5.2 函数信号发生器	14
1.5.3 示波器	16
第 2 章 电工技术实验	21
2.1 电路元件伏安特性的测绘	21
2.2 基尔霍夫定律与电位、电压的测量	28
2.3 戴维宁定理及有源二端网络参数测定	31
2.4 典型电信号的观察与测量	35
2.5 RC 一阶电路的时域响应	38
2.6 电感性负载电路功率因数的提高	43
2.7 三相交流电路	47
2.8 三相异步电动机的正反转控制	51
第 3 章 模拟电子技术实验	55
3.1 双极型分压式偏置放大电路	55
3.2 差分放大器实验	74
3.3 OTL 功率放大器实验	88

3.4	集成运算放大器基本运算电路的测试与设计	93
3.5	RC 串并网络(文氏桥)振荡器实验	102
3.6	负反馈放大电路实验	108
3.7	低频功率放大器的设计	113
3.8	集成直流稳压电源电路设计	114
第 4 章	数字电子技术实验	115
4.1	集成门电路逻辑功能测试	115
4.2	SSI 组合逻辑电路的设计与测试	125
4.3	译码器的应用与研究	130
4.4	数据选择器的应用与研究	136
4.5	触发器的研究	138
4.6	计数器及其应用	143
4.7	555 定时器及其应用	148
4.8	智力抢答器装置的设计	154
4.9	数字电子钟的设计	155
参考文献		157

1.1 实验目的和意义

电工电子技术实验是非电类各专业重要的实践性教学课程,通过电工电子技术实验课程的训练,能够加强学生对电工电子技术理论知识的理解,培养学生的基本实验技能,提高学生的电路综合应用与设计能力以及分析问题和解决问题的能力,同时提高学生的工程素质 and 创新能力,为后续课程的学习和今后从事相关的工作奠定良好的基础。

1.2 实验的基本过程

一般的电工电子技术实验,无论是基础实验,还是综合、设计型实验,尽管实验的目的和内容不同,但都具有相同或相似的实验过程,即实验前的准备、实验过程和实验后的总结。

1.2.1 课前预习

为了有效地完成实验任务并取得理想的实验结果,实验者必须进行课前预习,达到以下目的:

- (1) 认真阅读本次实验的相关内容并复习有关的理论知识,理解实验原理,明确实验目的和任务,拟定主要实验步骤,设计实验数据记录表格。
- (2) 熟悉实验所用仪器设备的功能、使用方法、注意事项和测试条件。
- (3) 完成预习报告。预习报告主要包括实验标题(实验名称、日期、实验者及合作者)、实验目的、实验原理、实验内容及步骤、拟定实验结果的记录图标和思考题解答。

1.2.2 课中实验

做好实验预习准备后,才可进入实验室进行实验。每位实验者都应自觉遵守学校和实验室管理的有关规定。

1. 准备工作

- (1) 按照编好的实验小组对号入座。
- (2) 检查本组的仪器设备、连接线是否齐全和符合要求,如有缺少或损坏应及时报告。
- (3) 将仪器设备合理布置,以方便使用和操作,合理安排实验现场。

2. 实验电路连接

(1) 应根据电路原理图确定元器件的位置,元器件的摆放要紧凑、不重叠,并依据信号流向(输入端在左侧、输出端在右侧)将元器件顺序连接,引线应越短越好,避免引线间相互交叉,以免造成短路现象,引线也不应跨接在集成电路上,而应从周围绕过。

(2) 电路安装完毕后,要认真检查电路连线是否正确,同组人员要相互检查,确定无误后,方可接入电源。

(3) 在直流稳压电源空载的情况下,调整出所需电压,直流稳压电源的示数为参考,应以万用表所测为准,断电后按极性要求接入实验电路。

(4) 在信号发生器空载时调整好频率和电压,使其满足实验要求。信号发生器的示数为参考,应以示波器所测为准,断电后接入实验电路,注意电路“共地”问题,所谓“共地”,即是将电路中所有接地的元件都接在电源的地电位参考点上。“共地”是抑制干扰和噪声的重要手段。

(5) 用万用表检查电源、信号源输入端和地之间是否有短路现象,若有,则必须检查并排除后方可通电。

(6) 电源打开后,不要急于测量数据和观察结果,先进行通电观察,检查有无异常,包括仪器、元器件有无打火冒烟,是否闻到异常气味,用手摸元器件是否发烫等现象。如发现异常,应立即关断电源,查清原因,排除故障后方可重新通电。

3. 测试与分析数据

(1) 测试时手不得接触测试笔或探头金属部位,以免影响测试结果。

(2) 对综合、设计性实验,先进行单元分级调试,再进行级联,最后进行整个系统的调试。

(3) 测量数据或观察现象要认真细致,实事求是。将实验测得的数据和波形记录在实验者自己设计的表格之内,作为原始实验数据。

每项实验内容完成后,应立即分析实验数据,及时与理论分析结果进行比较,判断误差是否在10%以内,如发现有较大差异,找出误差原因后,决定是否重新实验,或请指导老师共同查找原因。

实验中测量的原始数据应交指导教师检查,数据如果有误,需重新测量;教师检查数据正确并签字后,方可改接电路继续实验或最终拆除线路。

(4) 实验时每组同学应分工协作,轮流接线、记录和操作等,使每个同学得到全面训练。

4. 实验结束

(1) 实验结束后,先关掉仪器设备电源,再关掉实验电路供电电源,最后拆掉实验连线,拆线时手要捏住导线的底部,以防导线断开。

(2) 整理好实验台,保证实验设备及元器件清点无误后,方可离开实验室。

(3) 发生仪器设备损坏事故时,应及时报告指导教师,按有关实验管理规定处理。

(4) 每次实验结束,留值日生打扫卫生。

1.2.3 实验后的总结

实验完成后,实验者须撰写实验报告。撰写实验报告的过程是对实验进行总结和提高的过程。

书写实验报告应选用规定的实验报告用纸,实验报告由实验前的预习报告和实验完成后的数据分析报告两部分构成,书写报告要求结论简明且正确、分析合理、讨论深入、文理通顺、符号标准、字迹端正、图表清晰。在预习报告的基础上,实验数据分析报告要完成以下内容。

(1) 根据原始记录整理、处理测试的数据,列出表格或描绘波形。多次测量或数据较多时一定要对数据进行列表,表必须要有表题,标注于表格上方中间位置。如表不止一张,应依次编号并安插在相应的文字附近。除实验测试数据和有关图表同组者可以互相采用外,其他内容每个实验者都应独立完成。

(2) 得出实验结论。对实验方案和实验结果作出合理的分析,找出产生误差的原因,提出减少实验误差的措施。

(3) 整理实验的心得体会。对实验中遇到的问题,出现的故障现象,分析其原因,写出解决的过程、方法及其效果,简单叙述实验的收获和体会。

(4) 列出仪器设备清单。

1.3 安全用电常识

在电工电子技术实验过程中,需要使用电源和电气设备,所以实验者必须具备一定的安全用电常识,并且要遵守实验室的规章制度和安全规则,才能避免发生人身伤害事故,防止损坏实验仪器设备。

1.3.1 触电的基本知识

当发生人体触及带电体时,或带电体与人体间闪击放电时,或电弧波及人体时,电流通过人体与大地或其他导体形成闭合回路,称为触电。

触电对人体伤害的程度与通过人体电流的大小、电流作用的时间、电流流过人体的途径、电流的性质以及触电者的身体状况等因素有关。工频交流电是比较危险的,当1mA左右的电流通过人体时,会产生麻刺等不舒服的感觉,10~30mA的电流通过人体时,会产生麻痹、剧痛、痉挛、血压升高和呼吸困难等症状,但通常不会有生命危险,电流达到50mA以上就会引起心室颤动而有生命危险,100mA以上的电流足以致人于死地。

常见的触电方式有:单相触电、两相触电和跨步电压触电。人体接触一根火线所造成的触电称为单相触电;人体同时接触两根火线所造成的触电称为两相触电;偶有一相高压线断落在地面时,电流通过落地点流入大地,此落地点周围形成一个强电场,距落地点越近,电压越高,影响范围10米左右,当人进入此范围时,两脚之间的电位不同,就形成跨步电压,跨步电压通过人体的电流就会使人触电,这种触电方式成为跨步电压触电。

1.3.2 实验室安全用电规则

实验操作过程中,应遵守安全操作规则,避免发生触电,防止不必要的人身伤害甚至危及生命的情况发生,确保人身安全。实验过程应注意以下几点:

(1) 实验时不允许赤脚,注意人体与大地之间有良好的绝缘。要逐步养成单手操作的习惯。

(2) 实验前应搞清楚电源开关、熔断器和插座的位置,了解正确的操作方法,并检查其是否安全可靠。

(3) 检查仪器设备的电源线、实验电路中有强电通过的连接线等有无良好的绝缘外套,保证其芯线不裸露。

(4) 实验时接线要认真,相互仔细检查,确定无误后才能接通电源,初学或没有把握时,应由指导教师审查同意后再接通电源。

1.3.3 仪器设备及器件安全

(1) 在使用仪器设备前,应认真阅读使用说明书,掌握仪器的使用方法和注意事项。

(2) 仪器设备电源打开后,不要急于测量数据和观察结果,应先进行通电观察,检查有无异常,包括仪器、元器件有无打火冒烟,是否闻到异常气味,用手摸元器件是否发烫等现象。如发现异常,应立即关断电源,查清原因,排除故障后方可重新通电。

(3) 为了确保仪器设备安全,在实验室电柜、实验台及各仪器中通常都安装有电源熔断器。常用的熔断器有 0.5A、1A、2A、3A 和 5A 等规格,应注意按规定的容量调换熔断器,切勿随意代用。

(4) 实验中不得随意扳动、旋转仪器面板上的旋钮和开关,需要使用时也不要用力过猛地扳动或旋转。

(5) 更换仪器、插拔器件或改接线路时,必须先切断电源。

(6) 结束后,通常只要关断仪器设备电源,不必将仪器设备电源线拔掉。

1.3.4 触电急救知识

触电急救时,首先要使触电者迅速脱离电源,然后根据触电者的具体情况,迅速对症救护。

1. 迅速脱离电源

发现有人触电后,首先要设法切断电源。不能直接用手触及伤员,为使触电人迅速脱离电源,应根据现场具体条件,果断采取适当的方法和措施。如果是低压触电,可采取“拉”、“切”、“挑”、“拽”、“垫”的方法使触电者脱离电源。

(1) 拉:指就近拉开电源开关,拔出插头或插熔断器。

(2) 切:当电源开关、插座或瓷插熔断器距离触电现场较远时,可用带有绝缘柄的利器切断电源线。

(3) 挑:如果导线搭在触电者身上或压在身下,这时可用干燥的木棒、竹竿等挑开导线。

(4) 拽:救护人可戴上手套或手上包缠干燥的衣服等绝缘物品拖拽触电者。

(5) 垫:如果触电者由于痉挛,手指紧握导线,或导线缠绕在身上,可先用干燥的木板塞进触电者身下,使其与地绝缘。

2. 就地急救处理

触电急救应就地坚持进行,不要为方便而随意移动触电人,如确有需要移动时,抢救中断时间不应超过 30 秒。

3. 准确对症急救

触电人脱离电源后,现场急救人员应迅速对症抢救,并且设法联系医疗部门到场接替救治。触电急救方法主要有口对口人工呼吸法和胸外心脏按压法两种。

(1) 口对口人工呼吸法(适用于无呼吸但有心跳的触电者)如图 1-3-1 所示。使触电者仰卧于平地上,鼻孔朝天头后仰。首先清理口鼻腔,然后松口解衣裳;捏鼻吹气要适量;排气应让口鼻畅;吹 2 秒停 3 秒,5 秒 1 次最恰当。

(2) 胸外挤压法(适用于有呼吸但无心跳的触电者)如图 1-3-2 所示。将触电者仰卧于硬地上,松开领口解衣裳。当胸放掌不鲁莽,中指应该对凹膛;掌根用力向下按,压下一寸至半寸;压力轻重要适量,过分用力会压伤;慢慢压下突然放,1 秒 1 次最恰当。



图 1-3-1 口对口人工呼吸法图



图 1-3-2 胸外挤压法

1.4 测量误差和测量数据的处理

在实际测量中,由于测量仪器和工具的不准确,测量方法的不完善以及测量环境等各种因素的影响,会使实验测得的值和真实值之间存在差异,即产生测量误差。测量误差的存在具有必然性和普遍性,人们只能根据需要,将其限制在一定范围内而不可能完全加以消除。但若测量误差超过一定限度,测量就失去了意义,因此为了得到要求的测量精度和可靠的测试结果,需要认识误差性质,减小误差值,合理处理测量数据,获得更接近真实值的结果。

1.4.1 测量误差的分类

根据误差的性质,测量误差可分为系统误差、随机误差和疏忽误差三类。

1. 系统误差

在相同条件下多次测量同一量值时,误差的绝对值和符号保持不变,或当条件改变时按某种规律变化的误差称为系统误差。

引起系统误差的原因主要有以下几个方面:

(1) 测量仪器仪表和测量环境造成的误差。测量仪器仪表本身性能不完善造成测量精度有限,或内部噪声过大、元器件老化,使用仪器仪表时未满足所规定的使用环境,如环境温度、湿度或气压等不符合要求,都会造成系统误差。

(2) 测量方法和理论造成的误差。测量方法不合理或不够完善,测量所依据的理论不完善,如采用近似公式、忽略电源内阻等都会造成系统误差。

(3) 人员误差(个人误差)。它是由测量人员的感官分辨能力的限制和工作责任心等因素带来的误差。

2. 随机误差

随机误差又称偶然误差,是指对同一量值进行多次测量时,其绝对值和符号均以不可预定的方式无规律变化的误差。就单次测量而言,随机误差没有规律,其大小和方向完全不可预定,但当测量次数足够多时,其总体服从统计学规律。

随机误差是由测量过程中一系列相关因素微小的随机波动而引起的,如磁场或温度的微小变化、空气扰动、大地震动等偶然因素均可造成随机误差。随机误差的特点如下:

- (1) 在多次测量中误差绝对值的波动有一定的界限,即具有有界性。
- (2) 绝对值小的误差的出现机会多于大误差,即具有单峰性。
- (3) 当测量次数足够多时正负误差出现的机会几乎相同,即具有对称性。
- (4) 随机误差的算术平均值趋于零,即具有抵偿性。

由于随机误差的上述特点,可以通过多次测量取平均值的办法,来减小随机误差对测量结果的影响。

3. 疏忽误差

在一定的测量条件下测得值明显偏离实际值所形成的误差称为疏忽误差,也称为粗大误差或过失误差,应剔除不用。疏忽误差主要是由测量方法不当或错误、测量操作疏忽和失误以及测量仪器特别差造成的。

1.4.2 减小或消除测量误差的方法

1. 减小系统误差的方法

测量时产生系统误差的来源可能不止一个,也就不存在统一的方法来减小或消除系统误差,只能针对不同情况采取不同措施。下面是几种减小系统误差的常用方法。

(1) 引入修正项。对于常用仪表,经过检定,测出标度尺每一刻度点的绝对误差,列成表格或作出曲线,在使用该仪表时,可根据示值和该示值的修正值求出被测量的实际值,这样就可消除由于测量工具引入的系统误差。

(2) 消除产生误差的根源。例如,选择准确度高的仪器仪表,并尽量使其在规定的使用条件下工作;采用符合实际的理论公式,并使测量环境满足理论公式要求的实验条件;提高测量人员的业务素质等。

(3) 采用特殊的测量方法。实际测量中可根据测量仪器仪表和被测量的不同,采用不同的测量方法来达到减小误差的目的,如采用正负误差补偿法、等值替代法和零示法等。

替代法:替代法的实质是一种比较法,它是在测量条件不变的情况下,用一个数值已知且可调的标准量来代替被测量。在比较过程中,若仪表的状态和示值都保持不变,则仪表本身的误差和其他原因所引起的系统误差对测量结果基本上没有影响,从而消除了测量结果中仪表所引起的系统误差。

零示法:零示法是一种广泛应用的测量方法,主要用来消除因仪表内阻影响而造成的系统误差。在测量中,使被测量对仪表的作用与已知的标准量对仪表的作用相互平衡,以使仪表的指示为零,这时的被测量就等于已知的标准量。

正负误差补偿法:在测量过程中,当发现系统误差为恒定误差时,可以对被测量在不同的测量条件下进行两次测量,使其中一次所包含的误差为正,而另一次所包含的误差为负,取这两次测量数据的平均值作为测量结果,从而就可以消除这种恒定系统误差。

2. 减小随机误差的方法

随机误差不能完全消除,唯一的办法是尽可能多次测量,取多次测量结果的算术平均值,以减小随机误差的影响。测量次数越多,随机误差的影响越小。

3. 减小疏忽误差的方法

疏忽误差绝大多数情况下是由测量人员的粗心大意造成的,所以应在保证测量条件稳定的基础上,提高测量人员的工作责任心,树立科学严谨的工作态度。

1.4.3 测量误差的表示方法

1. 绝对误差

绝对误差定义为测量时仪表指示的数值(测量值) A_x 与被测量的真值 A_0 之间的差值。若绝对误差用 Δ 表示,则

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-4-1)$$

一般来说,真值 A_0 是个理想的概念,除理论真值和计量学约定的真值外,真值是无法精确得知的,只能使测量结果尽量地接近真值。因此,实际应用中,常用更高一级的标准仪表所测量的值 A 来代替真值 A_0 ,则

$$\Delta = A_x - A \quad (1-4-2)$$

在实际测量中常常用到校正值 C 的概念,它与绝对误差数值相等,符号相反,即

$$C = A - A_x = -\Delta \quad (1-4-3)$$

测量仪器仪表的校正值一般由计量部门检定给出,因此,当已知测量值 A_x 及相应的校正值 C 后,便可求出被测量的真值(相对真值),即

$$A = A_x + C \quad (1-4-4)$$

【例 1-4-1】用某电流表测量电流时,其读数为 5mA ,该表在检定时给出 5.00mA 刻度处的修正值为 $+0.02\text{mA}$,求被测电流的实际值。

解:由式(1-4-4)可得被测电流的实际值:

$$A = A_x + C = 5.00 + 0.02 = 5.02(\text{mA})$$

2. 相对误差

绝对误差虽然能表明测量值与被测量的真值之间的差异程度,但不能确切地反映被测量的准确程度。例如,测 20V 的电压时,绝对误差为 $+0.3\text{V}$;测量 200V 的电压时,绝对误差也为 $+0.3\text{V}$,虽然两者的绝对误差一样,但前者的误差对测量结果的相对影响比后者要大得多。因此,为了反映被测量的准确程度,又引入了相对误差的概念。

相对误差定义为绝对误差 Δ 与真值 A_0 的比值,一般用百分数表示,记为

$$\gamma_0 = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-4-5)$$

在相对误差的实际计算中,有时难以确定被测量的真值 A_0 ,这时往往用测量值 A_x 代替,即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (1-4-6)$$

一般情况下,在误差比较小时, γ_0 和 γ 相差不大,但在误差比较大时,两者悬殊较大,不能混淆。因此为了区分,通常把 γ_0 称为真值误差,把 γ 称为测量值相对误差。

相对误差只有大小和符号,没有量纲。

【例 1-4-2】 用两只电压表甲和乙分别测量两个电压值,甲表测量 150V 的电压时,绝对误差 $\Delta_{\text{甲}}$ 为 +1.5V,乙表测量 10V 电压时,绝对误差 $\Delta_{\text{乙}}$ 为 +0.5V,分别求甲、乙两表在上述测量中的相对误差。

解: 由式(1-4-5)可得,相对误差分别为

$$\gamma_{\text{甲}} = \frac{\Delta_{\text{甲}}}{U_1} \times 100\% = \frac{1.5}{150} \times 100\% = 1\%$$

$$\gamma_{\text{乙}} = \frac{\Delta_{\text{乙}}}{U_2} \times 100\% = \frac{0.5}{10} \times 100\% = 5\%$$

从上面的计算结果可以看出,虽然甲电压表的绝对误差比乙电压表的大,但相对误差小,所以甲电压表测量的电压结果比乙电压表准确。

3. 引用误差

相对误差可以表示某次测量结果的准确度,而不足以说明仪表本身的准确度,同一块仪表相对误差随着被测量减小逐渐增大,所以引入引用误差来表示仪表的准确度。

引用误差定义为绝对误差 Δ 与仪表的满量程值 A_m 的百分比,即

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (1-4-7)$$

【例 1-4-3】 某电流表满刻度为 5A,测量值为 4A,实际值为 4.02A,求该电流表的引用误差。

解: 由式(1-4-7)可得,该电流表的引用误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% = \frac{4 - 4.02}{5} \times 100\% = -0.4\%$$

4. 最大引用误差

由于在仪表测量范围内的每个示值的绝对误差都是不同的,很难加以确定,因此又引入最大引用误差的概念,最大引用误差定义为仪表在全量程范围内可能产生的最大绝对误差 Δ_m 与仪表的满量程值 A_m 的百分比,即

$$\gamma_{\text{max}} = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \quad (1-4-8)$$

最大引用误差也叫作仪表的准确度($\pm k\%$)。

我国电工测量仪表按照最大引用误差可分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 七个等级,如表 1-4-1 所示。随着仪表制造技术的发展,目前国内市场上已出现了准确度为 0.02 和 0.05 的指示仪表。

表 1-4-1 常用电工指示仪表的准确度等级分类表

等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
准确度	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5.0

【例 1-4-4】 一待测电压为 100V,如果采用 0.5 级满刻度值为 300V 的电压表和 1.0 级满刻度值为 100V 的电压表分别测量,求测量的最大可能相对误差各为多少?

解: 由式(1-4-8)可知,最大绝对误差为

$$\Delta_m = A_m \times \gamma_{\text{max}} = \pm A_m \times k\%$$