



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电工电子技术

(第二版) 第四分册

实 践 教 程

■ 太原理工大学电工基础教学部 编

系列教材主编 渠云田

第四分册主编 陈慧英



高等教育出版社
Higher Education Press

TM13/142=2

:4

2008



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

是器器内

电工电子技术

(第二版) 第四分册

实 践 教 程

■ 太原理工大学电工基础教学部 编

系列教材主编 渠云田

第四分册主编 陈慧英



高等教育出版社
Higher Education Press

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材《电工电子技术》(第二版)的第四分册,是根据教育部面向 21 世纪电工电子技术课程教改要求,结合电工电子技术课程的改革与实践编写而成。

全书共分 6 章和 1 个附录。第 1 章介绍电工电子实验基础知识;第 2 章介绍常用电工电子仪器仪表;第 3 至 6 章分别介绍电路基础、模拟电子技术、数字电子技术和电机与控制实验,详细介绍了基础性、综合性和设计性实验共 38 个;附录介绍了 Protel 2004 原理图与 PCB 设计内容。为适应电工电子技术课程学时的不同要求,实验的内容和难易程度涵盖了不同层次的教学要求,且大部分实验项目都有实验原理和思考题,可供教师和学生灵活选用。

本书是高等院校非电类专业、计算机专业等电工电子技术课程的实验教材,也可以作为从事系统设计、科研开发的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术. 第 4 分册, 实践教程/渠云田主编;陈惠英分册主编. —2 版. —北京:高等教育出版社,2008.4
ISBN 978-7-04-023631-6

I. 电… II. ①渠…②陈… III. ①电工技术-高等学校-教材②电子技术-高等学校-教材 IV. TM TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 023883 号

策划编辑 金春英 责任编辑 魏芳 封面设计 于文燕 责任绘图 尹莉
版式设计 马敬茹 责任校对 胡晓琪 责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街 4 号

邮政编码 100011

总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司

印 刷 涿州市京南印刷厂

购书热线 010-58581118

免费咨询 800-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landaco.com>

<http://www.landaco.com.cn>

畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×1092 1/16

印 张 11

字 数 260 000

版 次 2004 年 1 月第 1 版

2008 年 4 月第 2 版

印 次 2008 年 4 月第 1 次印刷

定 价 14.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 23631-00

第二版前言

21 世纪是科学技术飞速发展的时代,知识日新月异。为体现培养素质型、能力型的优秀人才的教育理念,根据教育部面向 21 世纪电工电子技术课程教学改革要求,结合我校电工基础教学部近年来对电工电子技术基础课程的改革与实践,在本书第一版的基础上,借鉴国内外优秀教材,重新修订编写,使教材更适应非电类专业、计算机专业等电工电子实验的教学要求。

本教材由太原理工大学电工基础教学部组织编写。全套教材共有六个分册,其中第一分册、第二分册是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,其余分册为其配套教材:第一分册,电路与模拟电子技术基础(分册主编李晓明、李凤霞),本分册主要介绍电路分析基础、电路的瞬态分析、正弦交流电路、常用半导体器件与基本放大电路、集成运算放大器、直流稳压电源、现代电力电子器件及其应用和常用传感器及其应用;第二分册,数字与电气控制技术基础(分册主编王建平、靳宝全),本分册主要介绍数字电路基础、组合逻辑电路、触发器与时序逻辑电路、脉冲波形的产生与整形、数模和模数转换技术、存储器与可编程逻辑器件、变压器和电动机、可编程控制器、总线、接口与互连技术等;第三分册,利用 Multisim 2001 的 EDA 仿真技术(分册主编高妍、申红燕),本分册主要介绍 Multisim 2001 软件的特点、分析方法及其使用方法,然后列举大量例题说明该软件在直流、交流、模拟、数字等电路分析与设计中的应用;第四分册,电工电子技术实践教程(分册主编陈惠英),本分册主要介绍电工电子实验基础知识、常用电工电子仪器仪表,详细介绍了 38 个电路基础、模拟电子技术、数字电子技术和电机与控制实验以及 Protel 2004 原理图与 PCB 设计内容;第五分册,电工电子技术学习指导(分册主编田慕琴),本分册紧密配合主教材内容,提出每章的基本要求和阅读指导,有重点内容、重点题目的讲解与分析,列举了一些概念性强、综合分析能力强并有一定难度的例题;第六分册,基于 EWB 的 EDA 仿真技术(分册主编崔建明、陶晋宜、任鸿秋),本分册主要介绍 EWB 5.0 软件的特点、各种元器件和虚拟仪器、分析方法,并对典型的直流、瞬态、交流、模拟和数字电路进行了仿真。全书由太原理工大学渠云田教授主编和统稿。本教材第一分册、第二分册由北京理工大学刘蕴陶教授审阅;第三分册、第六分册由太原理工大学夏路易教授审阅;第四分册、第五分册由山西大学薛太林副教授审阅。

本教材第四分册“电工电子技术实践教程”,共 6 章和 1 个附录,详细介绍了基础性、综合性和设计性实验共 38 个,按照 80~120 学时编写,其中陈惠英编写了第 1、3、4、5 章和附录 F.3,武培雄编写了第 2 章和附录 F.1、F.2,赵腊生编写了第 6 章,全书由陈惠英副教授进行统稿。

电工电子技术是一门具有工程特点和实践性很强的课程,实验是帮助学生学习和运用理论处理实际问题、验证消化和巩固基本理论、获得实验技能和科学研究方法的重要环节。本教材在内容的组织和编写上具有以下特色:

一、增加了“常用电工电子仪器仪表”一章,系统地介绍了常用电工电子仪器仪表的使用方法。

二、以教材基本理论为体系编写基础性实验。对教材中的基本概念、重要定理和分析方法,都编写了相应的基础性实验,且大部分实验都包含实验原理和思考题,以帮助学生掌握电工电子

技术的基本理论。

三、将基本测量方法的训练贯穿于实验的全过程。通过综合性实验,可使学生加深对单元功能电路的理解,了解各功能间的相互影响,掌握各功能电路之间参数的衔接和匹配关系,提高学生综合运用知识的能力。

四、强调对学生的能力培养,编写了设计性实验。通过设计性实验,可提高学生对于基础知识及基本实验技能的运用能力,掌握参数及电子电路的内在规律,可拓宽学生的知识面,以满足今后的发展要求。

五、为了加强学生的工程意识与创新能力,增加了现代电工电子新技术——Protel 2004 原理图与 PCB 设计内容,使学生可以轻松进行各种复杂的电子电路设计。

本书既可以作为高等院校非电类专业的电工电子技术实验教材,也可以作为电类专业及从事系统设计、科研开发的工程技术人员的参考用书。同时,在编写本教材过程中,编者曾参考了部分优秀教材,在此,谨对这些参考书的作者表示感谢。限于编者水平,时间仓促,书中错误,疏漏之处难免,敬请专家和读者批评指正,为提高电工电子技术实践教程的质量而共同奋斗。

编者

2007 年 10 月

第一版前言

为了使我国培养的新一代大学生能适应 21 世纪,这个科技飞速发展、竞争异常激烈的时代,根据国家教育部面向 21 世纪课程改革要求,结合我校电工电子系列课程建设与近年来的实验教学改革实践,编写了理工科非电类专业、计算机专业本科、专科适用的与我校电工基础教学部新编的《电工电子技术》(上、下册)配套使用的系列教材——《电工电子技术实践教程》。

本教程不仅旨在使学生巩固和加深理解所学的理论知识,更重要的是训练学生的电气技能,提高学生的动手能力和综合实践能力,同时培养学生严谨的科学作风和电气技能综合素质。

本教程是按 125 学时的教学要求编写的,实践学时不低于总学时的 35%,全书包括电气技能基础、电气技术实践和电气技能素质提高 3 章。

电气技能基础一章主要介绍了电工电子技术实验的地位与任务、基本要求;测量数据的处理;电工测量及其误差;实验室供电与安全用电等。通过对这些知识的学习,使学生懂得电工电子技术实验的重要性以及如何安全、顺利地每个实验,并在此基础上,训练学生科学地、规范地编写实验报告的能力。

电气技术实践一章共有 30 个实验,其中包括有基础实验、综合性实验、设计性实验和实训内容。基础实验 18 个,主要是与理论教学内容相对应的验证性原理实验,对每个实验的原理作了较精辟的说明,并增加了预习内容,便于学生课前预习。有的实验中介绍了几种不同的实验方法、线路及带“*”内容,可根据具体情况选用,或供学生参考。综合性、设计性实验和实训内容是在教学基本要求的基础上提高和扩展的内容,具有实用性、先进性、趣味性和综合性,可扩大学生知识面,亦可作为第二课堂的学习内容。

电气技能素质提高一章除了介绍与实验有关的常用电工、电子测量仪表与仪器的使用方法和注意事项外,还介绍了一些常用元器件(分立元件与集成芯片)的分类、型号和功能引脚图,另外还主要介绍了提高电气技能素质的基本环节和电子线路中故障排查与干扰的排除,使学生在电子仪器时更加自如,印制电路板的机辅设计是学生绘制电路图的好帮手。

本教程的特点之一是内容作了精选,减少了一些验证性的实验,增加了综合性、设计性实验和实训内容。如:电工技术部分删去“电路基本测量”;电子技术部分删去“两级放大电路”、“射极输出器”等;增加了“组合逻辑电路设计”、“温度控制电路设计”、“彩灯控制系统”、“出租车自动计费器”、“红外线遥控开关的设计与制作”等;电动机部分删去“变压器”、“三相异步电动机的起动与调速”等;增加了“异步电动机定子绕组的重绕”等,提高了学生的综合实验能力、分析能力和设计能力。

本教程的特点之二是配合 EDA 教学平台,不少实验是在 EDA 仿真的基础上设置的。如:“叠加定理、一阶 RC 电路的时域响应、交流电路频率特性研究、集成运放的线性应用、组合逻辑电路分析、时序逻辑电路分析、基本放大电路的综合分析、555 定时电路及应用、组合逻辑电路设计、红外线遥控开关的设计与制作”等,旨在利用现代化分析手段的基础上,进一步提高学生的

电气技能素质。

另外,为了加强学生的工程意识与创新能力,增加了现代电工电子新技术——可编程控制器(PLC)与 CPLD 实验和印制电路板的机辅设计等内容。

本教程主要是结合理工科非电专业电工电子技术课程的教学要求而编写,故在编写过程中力求做到与课程教学配合,但也兼顾计算机专业以及机电一体化专业,成人教育的函授、自考、电大、夜大、职大及高职等各类非电专业的实践教学要求,可满足不同层次电工电子技术教学大纲的要求。

本教程是编者多年来在电工电子技术实践教学经验的基础上编写的。郭爱莲编写第一章及第二章的电工技术实验、可编程控制器(PLC)和 CPLD 实验以及第三章的第二节(合编),李桂梅编写第二章的电子技术(模拟、数字)实验;综合性、设计性实验;实训内容(合编)及第三章第二节(合编)。

本书稿由太原理工大学李晓明教授主审,电工电子实验中心主任贾秀美、李彩萍高级工程师审阅,并提出了许多宝贵的意见和修改建议,我们根据提出的意见和建议进行了认真的修改。本教程在编写过程中,太原理工大学夏路易教授、渠云田教授以及电工基础教学部的所有教师和实验室老师,给予了极大的关心和支持,在此一并对他们表示衷心的感谢。

同时,编写本教程过程中,我们参考了部分优秀实验教材,在此,谨对这些参考书的作者表示感谢。

由于我们水平有限,书中缺陷和疏漏在所难免,恳请使用本教程的教师和读者批评指正,为提高电工电子技术实践教程的质量而共同努力。

编者

2003 年 9 月

目 录

第 1 章 电工电子实验基础知识	1
1.1 实验须知和实验室安全用电规则	1
1.2 测量误差的分析	3
1.3 测量数据的处理	8
1.4 电子电路的故障检查方法	11
第 2 章 常用电工电子仪器仪表	14
2.1 电工电子指示仪表概述	14
2.2 电工电子测量方法简介	16
2.3 常用电工电子仪器仪表	18
第 3 章 电路基础实验	27
3.1 叠加定理和基尔霍夫定律的验证	27
3.2 电压源与电流源的等效变换	30
3.3 戴维宁定理的研究	35
3.4 典型电信号的观察与测量	39
3.5 一阶 RC 电路的时域响应	42
3.6 阻抗的测定	46
3.7 荧光灯电路及功率因数的提高	49
3.8 RLC 串联谐振电路的研究	52
3.9 三相交流电路的测量	57
第 4 章 模拟电子技术实验	62
4.1 二极管的检测与应用	62
4.2 晶体管的简易测试	67
4.3 基本放大电路的分析	70
4.4 集成功率放大器测试	74
4.5 集成运放的线性应用	77
4.6 比例加减运算电路的设计	81
4.7 集成运放的非线性应用	82
4.8 整流、滤波、稳压电路的测试	85
4.9 可调集成直流稳压电源的设计	88
4.10 晶闸管的简易测试	89
4.11 红外线遥控开关的设计与制作	92
第 5 章 数字电子技术实验	97

5.1	TTL 集成门电路逻辑功能测试与变换	97
5.2	组合逻辑电路的分析	101
5.3	SSI 组合逻辑电路的设计	104
5.4	MSI 集成电路的功能测试及应用	105
5.5	触发器功能测试及其简单应用	108
5.6	时序逻辑电路的分析	112
5.7	任意进制计数器的设计	114
5.8	555 定时器及其应用	120
5.9	交通灯控制电路的设计	124
5.10	数字电子钟逻辑电路设计	125
第 6 章	电机与控制实验	128
6.1	变压器的连接与测试	128
6.2	三相异步电动机的起动与调速	131
6.3	三相异步电动机点动和自锁控制	134
6.4	三相异步电动机正反转继电 - 接触器控制	137
6.5	三相异步电动机的时间控制和顺序控制设计	139
6.6	行程控制工作台电路设计	140
6.7	PLC 控制三相异步电动机正反转	140
6.8	PLC 控制十字路口交通灯	142
附录	Protel 2004 原理图与 PCB 设计	146
F.1	Protel 2004 设计环境	146
F.2	原理图编辑模块	148
F.3	印制电路板编辑模块	153
参考文献		164

第1章 电工电子实验基础知识

1.1 实验须知和实验室安全用电规则

一、实验目的

电工电子技术实验是一门技术实验课,具有很强的实践性,是必不可少的教学环节。通过实验主要达到以下目的:

- ① 学习电工电子仪器仪表的工作原理和使用方法;
- ② 通过验证性实验,巩固和加深理解所学的基础理论知识;
- ③ 通过综合性、设计性实验,培养学生电路设计的能力;
- ④ 能够按实验电路图正确连接电路并测出相关实验数据;
- ⑤ 学习观察分析实验现象,记录和处理实验数据,排除实验故障。

二、实验进行方式

电工电子技术实验从预习相关的知识开始,经过连接电路、观察调试、记录数据,直到撰写出完整的实验报告,各环节完成的好坏,都会影响电工电子实验的教学质量。实验一般分预习实验、进行实验操作和撰写实验报告三个阶段。各个阶段的要求如下:

1. 预习实验

实验能否顺利进行、能否收到预期的效果,很大程度上取决于预习准备得是否充分。这就要求学生在预习时认真阅读实验教材和有关仪器仪表的使用,了解实验的基本原理以及实验线路、方法、步骤,清楚实验中要观察哪些现象、记录哪些数据和注意哪些事项,而且要撰写好预习报告。未完成预习报告或只有形式上的预习报告,不得参加实验。

2. 进行实验

严谨的操作程序和规范的操作方法,是顺利进行实验的有效保证。一般实验按照下列程序进行:

① 熟悉实验仪器设备及其使用方法与步骤,集中注意力听取指导教师的讲解。重点、要点及其注意事项往往是容易被忽略或在课本上根本学不到的。

② 实验电路的布置与连接是检验学生基本实验技能的首要环节。连接电路时导线长短要适中。接线太长,则缠绕不清,不便于检查;太短则牵扯仪器,易脱线造成故障甚至事故。对于复杂的电路,正确接线的程序是“按图布置,先串后并,先分后合,先主后辅”。未经指导教师认可,决不允许私自通电,切忌草率行事,盲目操作。

③ 为了保证实验结果的正确性,测量时可以用仪表的大量程预测数据的大致范围,再确定合适的量程,然后读数。指针式仪表读数时要做到三点成一线(眼、指针、镜子里的影子)。用示波器观察波形时要选择好扫描频率和输入衰减使波形稳定且大小适中。每次测量后,立即记录实测数据和波形于预习报告的表格中,并分析、判断所得数据及波形是否正确。

④ 对实验中的故障现象,应积极独立思考,耐心排除,并记录故障现象及排除方法。如发现有不正常现象(光、热、声、味、烟及表针异常等)应立即断开电源,报告实验指导教师,并及时查找故障原因。采集实验数据要求读数规范,观察实验现象力求准确。实验数据经教师核查签字后,实验线路才能拆除。

⑤ 实验完毕,先拉闸再拆线,做好仪器设备、桌面和环境的清洁整理工作,经指导教师同意后方能离开实验室。

3. 撰写实验报告

实验报告是实验工作的全面总结,实验报告应选用统一的报告格式认真撰写,做到条理清晰、图表简明、计算准确、分析合理、讨论深入、结论正确,并能正确回答思考题。同时实验报告也是考评学生实验成绩的主要依据。一份完整的实验报告一般应包括以下内容:

(1) 实验题目、实验者姓名、班级、合作者以及实验地点和时间

(2) 实验目的

(3) 实验原理

实验原理包括基本理论知识和实验电路的作用。设计性实验还包括实验电路的设计、电路参数的计算、测量方案的确定等。

(4) 实验仪器设备

实验仪器设备包括所用仪器设备的名称、型号、规格、数量等。

(5) 实验内容与步骤

(6) 数据分析及实验结论

根据原始记录整理、处理实验测试数据,列出表格或用坐标纸描出波形。找出产生误差的原因,提出减小误差的措施。

(7) 思考题解答

学生做完实验之后,应及时写好实验报告。不交报告者不得进行下一次实验。

三、实验室安全用电规则

在实验中,为了防止触电事故的发生,实验前应熟悉安全用电常识,实验过程中必须严格遵守安全用电制度和操作规程。

人体是导体,当人体不慎触及电源或带电导体时,电流通过人体,使人受到伤害,这就是电击。电击对人体的伤害程度与通过人体的电流的大小、通电时间的长短、电流通过人体的途径、电流的频率以及触电者的健康状况、精神状态等因素有关。

工频交流电是比较危险的,当人体有 1 mA 的工频电流通过时,就会有不舒服的感觉。根据表皮的潮湿程度,人体的电阻约在 $600\ \Omega \sim 100\ \text{k}\Omega$ 之间。通过人体的电流超过 50 mA 时,就会有生命危险。一般规定 36 V 为安全电压,但在实验中常用到 220 V 或 380 V 电压,为了防止触电事故发生,必须做到:

① 进入实验室后不经教师允许绝对不能擅自合闸,尤其是室内总电源。

② 实验过程中,同组人员必须配合默契,合电源时要及时与同组人员打招呼。如果有同学正在接线或改线,千万不能随便去接通电源。

③ 电源接通后,一定要注意不能用手触及带电部分,尤其是强电实验,以防触电。严格遵守“先接线后合电源,先断电源后拆线”的操作程序。

④ 绝对不能把一头已经接在电源上的导线的另一头悬空,电路其他部分也不能有悬空线头的现象,否则易出现电源短路或烧坏仪器、人员触电的情况。线路连接好后,多余导线都要拿开,放在抽屉里或合适的地方。

⑤ 万一发生触电事故,同组同学应做的第一件事就是迅速关断电源,或用绝缘的工具迅速将电源线断开,使触电者脱离电源。

⑥ 发现异常现象(声响、发热、冒烟、焦臭等)也应立即切断电源,查找原因。

⑦ 当被测值难以估算时,仪表量程应置最大,然后根据指示情况逐渐减少量程,同时被测值或大或小时要注意随时调节量程。

⑧ 遵守各项操作规程,培养良好的实验作风。安全用电的观点应当贯穿在整个实验过程中,要以主人翁的态度爱护仪器仪表,做到人员设备两安全。

1.2 测量误差的分析

测量是为确定被测对象的数值而进行的实验过程。在这个过程中,人们借助专门的仪器,把被测量与标准的同类单位量进行比较,从而确定被测量与单位量之间的数值关系,最后用数值和单位共同表示测量结果。

在任何测量中,由于各种主观和客观因素的影响,使得测量结果不可能完全等于被测量的实际值,而只是它的近似值,把测量值与被测量的实际值之差叫做测量误差。研究测量误差理论的目的就是掌握测量数据的分析计算方法,正确对测量误差值进行估计,选择最佳测量方案。

一、测量误差的分类

根据测量误差的性质和特征,测量误差可以分为系统误差、偶然误差和疏忽误差。

1. 系统误差

系统误差是由于仪表不完善、使用不恰当或测量方法采用了近似公式以及外界因素变化(温度、电场、磁场)等原因引起的。它遵循一定的规律变化或保持不变。按照误差产生的原因又分为:

(1) 基本误差

基本误差是指指示仪表在规定的正常条件下进行测量时所具有的误差。它是仪表本身所固有的,即由于结构上和制作上不完善而产生的误差。

(2) 附加误差

附加误差是由于外界因素的变化而产生的。主要原因是仪表没有在正常工作条件下使用,例如温度和磁场的变化、放置方法不合适等引起的误差。

(3) 方法误差

方法误差是因测量方法不完善或使用仪表的人在读数时因个人习惯不同而造成读数不准确,间接测量时用近似计算公式等造成的。

减小系统误差的方法有:

- ① 对仪表进行校正,在测量中引入更正值,可减小基本误差;
- ② 按照仪表所规定的条件使用,减小附加误差;
- ③ 采用特殊的方法测量,减小方法误差。例如零示法、替代法、补偿法、对照法等。

2. 偶然误差

偶然误差是由于某些偶然因素所造成的,如:电源电压的波动,电磁场的干扰,电源频率的变化及地面震动,热起伏等。

理论上当测量次数 n 趋于无限大时,偶然误差趋于零。而实际中不可能做到无限多次的测量,多次测量值的算术平均值很接近被测量真值,因此只要选择合适的测量次数,使测量精度满足要求,就可将算术平均值作为最后的测量结果。

3. 疏忽误差

疏忽误差是由于测量中的疏忽所引起的。由于疏忽所引起的疏忽误差一般使测量结果严重偏离被测量的实际值。如读数错误、记录错误、计算错误或操作方法错误等所造成的误差。

疏忽误差可以通过提高操作人员的测试技能和责任心加以避免。

二、正确度、精密度和准确度

对一组测量数据进行误差分析时,将疏忽误差剔除掉,只分析系统误差和偶然误差即可。

1. 正确度

正确度表示测量结果与实际值的符合程度,是衡量测量结果是否正确的尺度。系统误差使测量结果偏离被测量的实际值,因此系统误差越小,就有可能使测量结果越正确。在测量次数足够多时,对测量结果取算术平均值,可以减小偶然误差的影响。

2. 精密度

精密度表示在进行重复测量时所得结果彼此之间一致的程度。偶然误差决定测量值的分散程度,测量值越集中,测量值的精密度越高。可见,精密度用来表示测量结果中偶然误差大小的程度。

3. 准确度

对测量结果的评价,不能单纯用正确度或精密度来衡量,正确度高的精密度不一定高,精密度的正确度不一定高。二者均高,才表示测量值接近实际值,称为测量的准确度高。准确度表示测量结果中系统误差与偶然误差综合的大小程度。

要达到高准确度的测量,即误差的总和越小越好,就应该在测量中设法消除或减小系统误差与偶然误差的影响。

三、测量误差的表示方法

测量误差的表示方法有绝对误差、相对误差和引用误差三种。若要反映测量误差的大小和方向,可用绝对误差表示;若要反映测量的准确程度,则用相对误差表示。

1. 绝对误差

测量值(即仪表值 A_x)和被测量的实际值 A_0 之间的差值叫做绝对误差,用 Δ 表示,即

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

在计算时,可以用标准表的指示值作为被测量的实际值。

例 1-1 用一只标准电压表来鉴定甲、乙两只电压表时,读得标准电压表的指示值为 50.0 V,甲表读数为 51.0 V,乙表读数为 49.5 V,求它们的绝对误差。

解:甲表的绝对误差 $\Delta_{\text{甲}} = A_x - A_0 = (51 - 50) \text{ V} = 1 \text{ V}$

乙表的绝对误差 $\Delta_{\text{乙}} = A_x - A_0 = (49.5 - 50) \text{ V} = -0.5 \text{ V}$

可见,绝对误差是有大小、正负和量纲的量,正的表示测量值比实际值偏大,负的表示测量值比实际值偏小。甲表偏离实际值较大,乙表偏离实际值较小,说明乙表的测量值比甲表准确。

2. 相对误差

在测量不同大小的被测量时,不能简单地用绝对误差来判断测量结果的准确度,这时要用相对误差来表示。相对误差是绝对误差与被测量的实际值之比,通常用百分数来表示,即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

在实际工作中,常用仪表的指示值 A_x 近似代替 A_0 ,即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (1-3)$$

例 1-2 已知甲表测 100 V 电压时,其绝对误差 $\Delta_{\text{甲}} = +2 \text{ V}$,乙表测 20 V 电压时,其绝对误差 $\Delta_{\text{乙}} = -1 \text{ V}$,试求它们的相对误差。

解:甲表的相对误差

$$\gamma_{\text{甲}} = \frac{\Delta_{\text{甲}}}{A_0} \times 100\% = \frac{+2}{100} \times 100\% = +2\%$$

乙表的相对误差

$$\gamma_{\text{乙}} = \frac{\Delta_{\text{乙}}}{A_0} \times 100\% = \frac{-1}{20} \times 100\% = -5\%$$

可见,相对误差是一个没有量纲,只有大小和符号的量。虽然甲表的绝对误差大于乙表,但甲表的相对误差却比乙表小。这说明甲表的测量准确度要高些。

3. 引用误差

相对误差可用来反映某次测量的准确程度,但不能表示仪表在整个量程内的准确程度,即仪表的准确度。为划分仪表的准确度等级,引入了引用误差的概念。引用误差是绝对误差与仪表量程上限之比的百分数,即

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

由于仪表的各指示值的绝对误差不等,因此国家标准中电工仪表的准确度 K 是以用最大绝对误差计算的最大引用误差来确定的。即

$$\pm K = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \quad (1-5)$$

按照国家标准规定;常用电工仪表的准确度 K 共分为七个等级,如表 1-2-1 所示。

表 1-2-1 仪表的准确度等级

仪表的准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5
基本误差/%	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5

例 1-3 有一个 8 V 的被测电压,若用 0.5 级、量程为 0~10 V 和 0.2 级、量程为 0~100 V 的两只电压表测量,问哪只电压表测得更准些? 为什么?

解:要判断哪块电压表测得更准确,即判断哪块表的测量准确度更高。

(1) 用 0.5 级、量程为 0~10 V 的电压表测量,可能出现的最大绝对误差

$$\Delta_m = \pm K \cdot A_m = \pm 0.5\% \times 10 = \pm 0.05 \text{ V}$$

可能出现的最大相对误差

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_0} \times 100\% = \frac{\pm 0.05}{8} \times 100\% = \pm 0.625\%$$

(2) 用 0.2 级、量程为 0~100 V 的电压表测量,可能出现的最大绝对误差

$$\Delta_m = \pm K \cdot A_m = \pm 0.2\% \times 100 = \pm 0.2 \text{ V}$$

可能出现的最大相对误差

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_0} \times 100\% = \frac{\pm 0.2}{8} \times 100\% = \pm 2.5\%$$

从计算结果可以看出,用量程为 0~10 V、 ± 0.5 级电压表测量所产生的最大相对误差小,所以选用量程为 0~10 V、 ± 0.5 级电压表测量更准确。

由此看出,准确度等级的数值越小,允许的基本误差越小,表示仪表的准确度越高。一般情况下,指针在 2/3 满刻度以上时才有较好的测试结果。因此,使用者应根据测试估计值的大小合理选择仪表量程,方可得到较小的最大相对误差。当然,相同量程时,追求高精度才是有意义的。

四、测量误差的合成

在实际测量中,一个被测量的获得往往可能要采用直接测量、间接测量等多种测量手段。测量误差合成理论研究在间接测量中,如何根据若干个直接测量量的误差求总测量误差的问题。

现假设被测量 y 与直接测量量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 满足关系式

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

则被测量 y 的测量结果所含绝对误差等于该函数的全微分,即

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n$$

其相对误差为

$$\gamma_y = \frac{dy}{y} = \frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \frac{dx_1}{y} + \frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \frac{dx_2}{y} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \cdot \frac{dx_n}{y} \quad (1-6)$$

下面讨论常用的几种典型情况:

① 被测量为直接测量值之和。设 $y = Ax_1 + Bx_2$

则

$$dy = Adx_1 + Bdx_2 \quad (1-7)$$

$$\gamma_y = \frac{dy}{y} = A \frac{dx_1}{y} + B \frac{dx_2}{y} = A \frac{x_1}{y} \gamma_{x1} + B \frac{x_2}{y} \gamma_{x2} \quad (1-8)$$

在最不利的情况下,最大误差将发生在各直接测量量的误差符号相同时,所以估算误差时,对式(1-7)、式(1-8)各项均取绝对值,即

$$|dy| = A|dx_1| + B|dx_2|$$

$$|\gamma_y| = \left| A \frac{x_1}{y} \gamma_{x1} \right| + \left| B \frac{x_2}{y} \gamma_{x2} \right|$$

② 被测量为直接测量值之差。设 $y = Ax_1 - Bx_2$

则 $dy = Adx_1 - Bdx_2$ (1-9)

$$\gamma_y = \frac{dy}{y} = A \frac{dx_1}{y} - B \frac{dx_2}{y} = A \frac{x_1}{y} \gamma_{x1} - B \frac{x_2}{y} \gamma_{x2} \quad (1-10)$$

在最不利的情况下,最大误差将发生在各直接测量量的误差符号相反时,所以估算误差时,对式(1-9)、式(1-10)各项均取绝对值,即

$$|dy| = A|dx_1| + B|dx_2|$$

$$|\gamma_y| = \left| A \frac{x_1}{y} \gamma_{x1} \right| + \left| B \frac{x_2}{y} \gamma_{x2} \right|$$

③ 被测量为直接测量值的积或商。设 $y = x_1^n \cdot x_2^m \cdot x_3^p$

其中, m, n, p 为任意常数。对上式两边取对数,则 $\ln y = n \ln x_1 + m \ln x_2 + p \ln x_3$

再微分得

$$\frac{dy}{y} = n \frac{dx_1}{x_1} + m \frac{dx_2}{x_2} + p \frac{dx_3}{x_3}$$

在最不利的情况下,最大误差为

$$|\gamma_y| = |n\gamma_{x1}| + |m\gamma_{x2}| + |p\gamma_{x3}| \quad (1-11)$$

这里需要说明,指数越高,对误差的影响越大,直接测量时所用仪表的准确度等级应选高一些。

通过上面的分析可以看出,间接测量的准确度较低,所以能够直接测量的就不要采用间接测量。如果条件不允许,必须采用间接测量时,对所需的直接测量量以及它们与被测量之间的关系,还有所用的仪表准确度等级、量程范围等问题,都要认真考虑,否则,即使仪表准确度等级很高,也可能出现不可信赖的测量结果。

例 1-4 如图 1-2-1 所示为一振荡器,为了测量振荡器的最大功率输出,采用间接法进行测量。以标准电阻作为负载,用电压表测量它两端的电压。选用的电压表准确度等级为 1.5 级,量程为 10 V,读数为 8 V,电压表的内阻为 20 kΩ,选用的标准电阻为 0.05 级,100 Ω。试求:

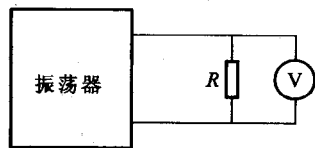


图 1-2-1 例 1-4 的电路图

- (1) 振荡器的输出功率;
- (2) 由于仪表结构的不完善和制造上的缺陷所引起的误差(相对误差);
- (3) 测量方法不完善所引起的误差;
- (4) 总的最大相对误差。

解:(1) 振荡器的输出功率为

$$P = U^2 / R = 8^2 / 100 \text{ W} = 0.64 \text{ W}$$

(2) 测量时电压表的基本误差为

$$\gamma_U = \pm \frac{0.015 \times 10}{8} \times 100\% \approx \pm 1.88\%$$

而

$$\gamma_R = \pm 0.05\%$$

所以在测量时可能产生的最大相对误差为

$$|\gamma_P| = |\gamma_U| + |\gamma_R| = |\pm 1.88\%| + |\pm 0.05\%| = 3.81\%$$

(3) 电压表功率损耗为 U^2 / R_U , 因此由于测量方法不完善所引起的误差为

$$|\gamma_m| = \frac{U^2 / R_U}{U^2 / R + U^2 / R_U} = \frac{R}{R + R_U} = \frac{100}{100 + 20\,000} \approx 0.50\%$$

(4) 总的最大相对误差为

$$|\gamma| = |\gamma_P| + |\gamma_m| = 3.81\% + 0.50\% = 4.31\%$$

五、思考题

1. 有一个 100 V 的被测电压,若用 0.5 级、量程为 0 ~ 300 V 和 1.0 级、量程为 0 ~ 100 V 的两只电压表测量,问哪只电压表测得更准些? 为什么?

2. 根据公式 $W = \frac{U^2}{R}t$, 用间接测量法测量某一电阻 R 在 t 时间内消耗的能量,通过测量算得 U 、 R 、 t 的相对误差分别为 $\gamma_U = \pm 1\%$, $\gamma_R = \pm 0.5\%$, $\gamma_t = \pm 1.5\%$, 试求在测量 W 中可能产生的最大相对误差是多少?

1.3 测量数据的处理

在测量和数字计算中,用几位数字来表示测量或计算结果是很重要的,它涉及有效数字和计算规则的问题。

一、有效数字的正确表示法

在测量中必须正确地读取数据,即除末位数字欠准确外,其余各位数字都是准确可靠的,其包含的误差不应大于末位单位数字的一半。例如用 50 mA 量程的电流表测量某支路的电流,读数为 32.5 mA,则前面两个数“32”是准确的可靠读数,称为“可靠数字”;而最后一位数字“5”是估读的,称为“欠准数字”,两者合起来称为“有效数字”,其有效数字为 3 位。

对有效数字位数的确定说明如下:

① 记录测量数值时,只允许保留 1 位可疑数字。通常,最后一位有效数字可能有 ± 1 个单位或 ± 0.5 个单位的误差。

② 数字“0”在数字中间可能是有效数字,也可能不是有效数字。例如:0.041 5 kV,前面的两个“0”不是有效数字,它的有效数字为 3 位。0.041 5 kV 可以写成 41.5 V,它的有效数字