



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电工电子技术

第四版 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 田慕琴

第四分册主编 陈惠英 武培雄

高等教育出版社



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电工电子技术

Diangong Dianzi Jishu

第四版 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 田慕琴

第四分册主编 陈惠英 武培雄

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是普通高等教育“十二五”国家级规划教材,全书共分13章。第1章介绍了电工电子实验基础知识;第2章介绍了常用电工电子仪器仪表;第3~6章分别介绍了电路基础实验、模拟电路基础实验、数字电路基础实验和变压器与电机控制实验,共计24个基础实验。第7~9章、第12章分别介绍了电路综合实验、模拟电路综合实验、数字电路综合与设计实验和可编程控制器实验,共计24个综合实验。第10章、第11章分别介绍了模拟电路课程设计、数字电路课程设计。第13章介绍了Altium Designer 14原理图与PCB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课程的实验教材,也可以作为电类专业电路基础、模拟电子技术、数字电子技术和可编程控制器课程的实验教材,还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. 第四分册, 实践教程/渠云田, 田慕琴主编; 陈惠英, 武培雄分册主编; 太原理工大学电工基础教学部编. --4版. --北京: 高等教育出版社, 2016.9

ISBN 978-7-04-045792-6

I. ①电… II. ①渠… ②田… ③陈… ④武… ⑤太…
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(2016)第 149274 号

策划编辑	金春英	责任编辑	许海平	封面设计	于文燕	版式设计	张杰
插图绘制	杜晓丹	责任校对	陈旭颖	责任印制	刘思涵		

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	唐山市润丰印务有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	16	版 次	2004年1月第1版
字 数	390千字		2016年9月第4版
购书热线	010-58581118	印 次	2016年9月第1次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	24.70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 45792-00

第四版前言

21 世纪是科学技术飞速发展的时代,新知识日新月异。为体现培养素质型、能力型的优秀人才的教育理念,根据教育部教学指导委员会会议精神,结合我校近年来对电工电子技术基础课程、电路基础课程、模拟电子技术课程、数字电子技术课程和可编程控制器课程的改革与实践,在 2012 年本教材第三版的基础上,借鉴国内外优秀教材,重新修订编写,使本教材更适应电类基础课程和非电类专业电工电子实验的教学要求。

实验是帮助学生学习和运用理论知识处理实际问题、验证消化和巩固基本理论知识、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:

1. 编写了“电工电子实验基础知识”和“常用电工电子仪器仪表”两章,系统地介绍了测量误差的分析、实验数据的处理、电子电路故障的检查方法、基本测量方法和常用电工电子仪表的使用方法等知识。

2. 以教材基本理论为体系编写基础性实验。对教材中基本概念、重要定理和分析方法,都编写了相应的基础性实验。且每个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。

3. 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,了解各功能电路间的相互影响,掌握各功能电路之间参数的衔接和匹配关系,可提高学生综合运用知识的能力。

4. 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。

5. 为了加强学生的工程意识与创新能力,增加了 Altium Designer 14 原理图与 PCB 设计,使学生可以轻松进行各种复杂的电子电路设计。

《电工电子技术》(第三版)系列教材第一至第六分册是普通高等教育“十二五”国家级规划教材,系列教材由渠云田、田慕琴担任主编。本教材是第四分册——实践教程,由太原理工大学电工基础教学部组织编写,陈惠英、武培雄担任主编,陈惠英编写第 1 章,郭爱莲编写第 2 章,赵腊生编写第 3 章,李胜编写第 4 章,武亚雄编写第 5 章,王树红(太原学院)编写第 6 章,李彩萍编写第 7 章,李桂梅编写第 8 章,田慕玲编写第 9 章,苏斌编写第 10 章,武兴华编写第 11 章,胡晚芝编写第 12 章,武培雄编写第 13 章,全书由陈惠英、武培雄进行统稿。

一套高质量的教材是提高教学质量的重要保证,本教材按照 80~120 学时编写,共 13 章,详细介绍了基础性、综合性和设计性实验共 48 个。一般性实验每次为 2 学时,设计性实验为 3 学时。本书既可以作为高等院校非电类专业的电工电子技术课程的实验教材,也可以作为电类专业电路基础、模拟电子技术、数字电子技术和可编程控制器课程的实验教材,还可以作为从事系统设计、科研开发的工程技术人员参考书。

最后,感谢使用本书的各高校教师和读者,虽然我们精心组织、认真编写,但难免有不妥和疏漏之处,恳请读者给予批评指正。

编者

2016年1月

目 录

第 1 章 电工电子实验基础知识	1	5.6 集成计数器及其应用	82
1.1 实验须知和实验室安全用电规则	1	第 6 章 变压器与电机控制实验	88
1.2 测量误差的分析	3	6.1 变压器绕组的连接与测试	88
1.3 测量数据的处理	8	6.2 三相异步电动机的起动与调速	90
1.4 电子电路的故障检查方法	11	6.3 三相异步电动机点动和自锁控制	94
第 2 章 常用电工电子仪器仪表	14	6.4 三相异步电动机正反转继电器-接触器 控制	96
2.1 电工电子指示仪表概述	14	6.5 三相异步电动机的时间控制和顺序 控制设计	98
2.2 电工电子测量方法简介	16	6.6 行程控制工作台电路设计	99
2.3 常用电工电子仪器仪表	18	第 7 章 电路综合实验	100
第 3 章 电路基础实验	32	7.1 RC 一阶电路的响应测试	100
3.1 叠加定理和基尔霍夫定律的验证	32	7.2 二阶动态电路响应的研究	103
3.2 电压源模型与电流源模型的等效 变换	35	7.3 RLC 串联谐振电路的研究	106
3.3 戴维宁定理的研究	39	7.4 双口网络的研究	109
3.4 日光灯电路及功率因数的提高	42	7.5 负阻抗变换器的研究	112
3.5 三相交流电路的测量	45	第 8 章 模拟电路综合实验	117
第 4 章 模拟电路基础实验	50	8.1 两级交流放大电路	117
4.1 晶体管特性测试	50	8.2 电压串联负反馈放大电路	121
4.2 基本放大电路的分析	51	8.3 差分放大电路	124
4.3 比例及加、减运算电路	55	8.4 OTL 功率放大器	128
4.4 电压比较器	58	8.5 RC 振荡电路	132
4.5 射极跟随器	62	8.6 LC 振荡电路	135
4.6 整流滤波电路	65	8.7 集成功率放大器	137
4.7 晶闸管的测试	68	第 9 章 数字电路综合与设计实验	142
第 5 章 数字电路基础实验	71	9.1 加法器的应用及设计	142
5.1 TTL 门电路的测试与组合逻辑电路 分析	71	9.2 组合逻辑电路设计	146
5.2 TTL 集电极开路门与三态门的应用	73	9.3 时序逻辑电路设计	147
5.3 编码器、数据选择器、译码器及其 应用	76	9.4 移位寄存器及其应用	149
5.4 触发器的测试及简单应用	78	9.5 单稳态触发器与施密特触发器	154
5.5 时序逻辑电路的分析	81	9.6 D/A 、 A/D 转换器	160
		第 10 章 模拟电路课程设计	166

10.1	电子电路设计方法	166	12.2	定时器/计数器应用实验	196
10.2	直流稳压电源设计	168	12.3	竞赛抢答器	199
10.3	信号发生器电路设计	172	12.4	三相异步电动机正反转	201
10.4	基于 555 电路的 V/F 转换器 设计	177	12.5	四节传送带的模拟	204
第 11 章	数字电路课程设计	180	12.6	十字路口交通灯控制	207
11.1	四路彩灯显示系统	180	12.7	三层楼电梯控制系统	211
11.2	交通信号灯自动控制系统	182	第 13 章	Altium Designer 14 原理图 与 PCB 设计	214
11.3	八路数字抢答器	185	13.1	Altium Designer 14 设计环境	214
11.4	数字电子钟	188	13.2	电路原理图绘制	216
11.5	电子拔河游戏机	190	13.3	印制电路板设计	230
第 12 章	可编程控制器实验	194	参考文献		246
12.1	基本指令编程练习	194			

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,排除电路故障。

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、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

实验能否顺利进行和收到预期的效果,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. 实验操作

严谨操作程序和良好的工作方法,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简要讲解。重点、要点及其注意事项往往是容易忽略或在课本上根本学不到的。

② 实验线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 测量时为了保证实验结果的正确性,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 对待实验中的故障现象,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。实验数据须经指导教师核查签字后,实验线路才能拆除。

⑤ 实验完毕,先断电再拆线,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,做到条理简明、图表清晰、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 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 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,提出减少误差的措施。

⑦ 思考题解答。

学生做完实验之后,应及时写好实验报告。不交实验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。

人体是导电体,当人体不慎触及电源及带电导体时,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。根据皮肤的潮湿程度,人体的电阻在 $600\ \Omega \sim 100\ \text{k}\Omega$ 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 进入实验室后不经指导教师允许绝对不能私自合闸,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时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空甩着,电路其他部分也不能有空甩线头的现象,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,并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,并注意,当被测值或大或小时要随时调节量程。

⑧ 遵守各项操作规程,培养良好的实验作风。安全用电的意识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,我们把测量值与被测量的实际值之差称为测量误差。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的不完善、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振动、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。由于疏忽所引起的测量结果一般都严重偏离被测量的实际值。如读数错误、记录错误、计算错误或操作不当等所造成的误差。

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,精密度是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,精密度高,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。准确度是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 之间的差值称为绝对误差,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检定甲、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,问哪只电压表测量更准些? 为什么?

解:要判断哪只电压表测得更准确,即判断哪只电压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

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

可能出现的最大相对误差 $\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_0} \times 100\% = \frac{\pm 0.05}{8} \times 100\% = \pm 0.0625\%$

(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

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

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,仪表的基本误差越小,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准确的测试结果。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

$$dy = A dx_1 + B dx_2 \quad (1-7)$$

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

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

$$dy = A dx_1 - B dx_2 \quad (1-9)$$

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

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

$$|dy| = A |dx_1| + B |dx_2| \quad |\gamma_y| = \left| A \frac{x_1}{y} \gamma_{x1} \right| + \left| B \frac{x_2}{y} \gamma_{x2} \right|$$

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,须采用间接测量时,对所需的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:

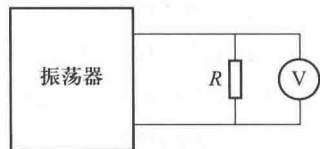


图 1-2-1 例 1-4 电路图

- (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

$$\gamma_v = \pm \frac{1.5 \times 10}{8} \times 100\% = \pm 1.88\%$$

而 $\gamma_R = \pm 0.05\%$, 所以在测量时可能产生的最大相对误差为

$$|\gamma_P| = |2\gamma_v| + |\gamma_R| = |\pm 2 \times 1.88\%| + |\pm 0.05\%| = 3.81\%$$

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

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

(4) 总的最大相对误差为

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

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,问哪只电压表测量得更准些? 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 $\gamma_U = \pm 1\%$, $\gamma_R = \pm 0.5\%$, $\gamma_t = \pm 1.5\%$,问在测量 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,该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,我们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“可靠数字”;而最后一位数字“5”是估读的,称“欠准数字”,两者合起来称“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,只允许保留一位可疑数字。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:0.0415 kV,前面的两个“0”不是有效数字,它的有效数字为 3 位。0.0415 kV 可以写成 41.5 V,它的有效数字仍然为 3 位,可见前面的两个“0”仅与所用单位有关。又如 30.0 V 有效数字为 3 位,后面的两个“0”都是有效数字。对于读数末尾的“0”不能任意增减,它是由测量设备的准确度来决定的。

③ 大数值与小数值要用幂的乘积形式来表示,例如,测得某电阻的阻值是 15 000 Ω ,有效数字为 3 位,则应记为 $1.50 \times 10^4 \Omega$ 或 $150 \times 10^2 \Omega$ 。

④ 在计算中,常数(如 π 、 e 等)及乘子(如 $\sqrt{2}$ 、 $\frac{1}{2}$)的有效数字的位数可以没有限制,在计算中需要几位就取几位。

二、有效数字的修约规则

当需要 n 位有效数字时,对超过 n 位的数字就要根据舍入规则进行处理。目前广泛采用的“四舍五入”规则内容如下:

① 被舍去的第一位数大于 5,则舍 5 进 1,即有效数字末位数加 1。例如把 0.26 修约到小数点后一位数,结果为 0.3。

② 被舍去的第一位数小于 5,则只舍不进,即有效数字末位数不变,例如把 0.33 修约到小数

点后一位数,结果为 0.3。

③ 被舍去的第一位数等于 5,而 5 之后的数不全为 0,则舍 5 进 1,即有效数字末位数加 1。把 0.650 1 修约到小数点后一位数,结果为 0.7。

④ 被舍去的第一位数等于 5,而 5 之后无数字或为 0,应按使所取有效数字的末位上的数字凑成偶数的原则来进行取舍,即 5 前面为偶数,则只舍不进,即有效数字末位数不变;5 前面为奇数,则舍 5 进 1,即有效数字末位数加 1,例如把 0.250 和 0.350 修约到小数点后一位数,结果为 0.2 和 0.4。

例 1-5 将下列数字保留 3 位有效数字。

103 504 0.036 798 21.251 0 21.250 0 21.35

解: $103\,504 \rightarrow 1.04 \times 10^5$

$0.036\,798 \rightarrow 0.036\,8$

$21.251\,0 \rightarrow 21.3$

$21.250\,0 \rightarrow 21.2$

$21.35 \rightarrow 21.4$

三、有效数字的运算规则

处理数据时,常常需要一些准确度不相等的数值,按照一定的规则计算,既可以提高计算速度,也不因数字过少而影响计算结果的准确度,常用规则如下:

1. 加法运算

参加加法运算的各数所保留的小数点后的位数,一般应与各数中小数点后位数最少的相同。例如:13.6、0.057 和 1.668 相加,小数点后位数最少的是一位(13.6),所以应将其余二数修约到小数点后一位数,然后相加,即 $13.6+0.1+1.7=15.4$ 。

为了减少计算误差,也可在修约时多保留一位小数,即 $13.6+0.06+1.67=15.33$,其结果应为 15.3。

2. 减法运算

参加减法运算的数据,数值相差较大时,运算规则与加法相同。如果两数相差较小时,运算后将失去若干位有效数字,致使测量误差很大,解决的办法是尽量采用其他测量方法。

3. 乘除运算

乘除运算时,各因子及计算结果所保留的位数,一般以百分误差最大或有效数字位数最少的项为准,不考虑小数点的位置。例如:0.12、1.058 和 23.42 相乘,有效数字位数最少的是两位,则 $0.12 \times 1.1 \times 23 = 3.036$,其结果为 3.0。

同样,为了减少计算误差,也可在修约时多保留一位小数,即 $0.12 \times 1.06 \times 23.4 = 2.976\,48$ 其结果为 3.0。

4. 乘方及开方运算

运算结果比原数多保留一位有效数字。例如: $(25.6)^2 = 655.4$, $\sqrt{4.5} = 2.12$ 。

5. 对数运算

取对数前后的有效数字位数相同。例如: $\ln 106 = 4.66$, $\lg 7.654 = 0.883\,9$ 。

四、测量数据处理方法

测量数据的处理方法很多,常用的有列表法和图解法。

1. 列表法

列表法就是将实验中直接测量、间接测量和计算过程中的数值,依据一定的形式列成表格,让读者能清楚地从表格中得知实验中的各种数据。例如表 1-3-1 所示的是某一电路输出端电压值与负载的对应关系。列表法的优点是结构紧凑、简单、便于比较分析、容易发现问题或找出各物理量之间的相互关系和变化规律。

表 1-3-1 列表法

R_L/Ω	100	200	300	500	700	1 000
U_L/V	2.00	1.33	1.00	0.67	0.50	0.36

2. 图解法

图解法就是根据实验数据画出一条或几条反映真实情况的曲线,从曲线上找出被测量的数值。采用图解法要注意:

- ① 选择坐标系 坐标系有直角坐标系、极坐标系和对数坐标系。
- ② 标明坐标的名称和单位,标好坐标分度 分度的大小要根据测得的数据合理选择。被测量的符号应写在纵轴的左方和横轴的上方,而单位应写在纵轴的右方和横轴的下方。
- ③ 合理选取测量点 在测量中,被测量的最大值和最小值必须测出,另外,在曲线变化陡峭部分要多测几个点,在曲线变化平缓部分可少取一些点。
- ④ 标明测试点 根据测量数据,在坐标图中标明测试点,测试点的符号可用“.”、“。”、“×”、“Δ”等表示,同一条曲线测试点符号要相同,而不同类别的数据,则应以不同的记号区别开来,如图 1-3-1 所示。

⑤ 连线 把坐标图上各测试点符号用线连接起来。

⑥ 修匀曲线 测量结果应是一条光滑的曲线,而不是折线。由于测量过程中偶然误差的影响,测试点的值有时产生正误差,有时产生负误差,所以在绘制曲线时,应消除偶然误差的影响,使曲线变得光滑。

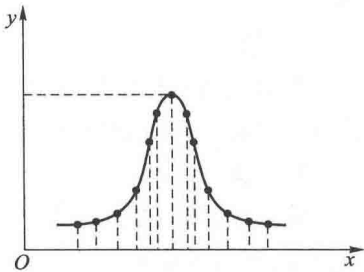


图 1-3-1 测试点标示图

五、思考题

① 按照“四舍五入”规则,将下列数据进行处理,要求保留 4 位有效数字。

3.141 59; 2.717 39; 3.216 50; 3.623 5; 26.457

② 按照有效数字的运算规则,计算下列结果。

1.172 3×3.2; 1.172 3×3.20; 66.09+4.853; 90.4-1.353