

21

世纪高等学校教材

电路与电工技术 实践教程

李凤霞 陈惠英 编

21 SHI JI
GAO DENG XUE XIAO
JIAO CAI



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

21 世纪高等学校教材

电路与电工技术教程 实践教学教程

李凤霞 陈惠英 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是为配合《电路分析》、《电工学》两门课程的实验课而编写的实验教材。全书共四章三十九小节。第一章介绍了电路测试的基本知识；第二章、第三章为主要章节，共 26 个实验，主要内容有电子元器件的识别与测量、稳态电路与暂态电路的测试、变压器、异步电动机的继电接触器控制电路等，可供电类学生和非电类学生选择使用；第四章介绍了常用的 8 种仪器与仪表的原理与使用。

本书不仅是高等院校电类、非电类专业本科生、专科生的实验课教材，而且可作为职业技术教育、成人教育等有关专业的实验课教材，也可供有关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路与电工技术实践教程/李凤霞, 陈惠英编. 北京:
中国电力出版社, 2002
21 世纪高等学校教材
ISBN 7-5083-0979-0

I. 电... II. ①李...②陈... III. ①电路-高等学校-教材②电工技术-高等学校-教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 016499 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)
北京密云红光印刷厂印刷
各地新华书店经售

2002 年 4 月第一版 2002 年 4 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.75 印张 241 千字
印数 0001—5000 册 定价 14.50 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前言

电路与电工学实验是一个重要的实践性教学环节。实验的目的不仅是要帮助学生巩固和加深理解所学的知识,更重要的是训练学生的实验技能,培养学生的动手能力和基本素质。

为适应实验教学的需要,各校自 90 年代以来已编写了多种版本的电路、电工学实验教材,这些教材在不同时期的教学过程中都起到了积极的作用,收到了较好的成效。随着人类进入 21 世纪,知识日新月异,科技迅猛发展,原有的教材已不能满足不断深化的教学改革的需求,故编者在已有教材的基础上,结合最新要求重新编写了《电路与电工技术实践教程》一书。本书具有以下特点:

(1) 着重于学生实际技能和创新意识的培养,使学生能独立组织和进行实验,提高学生的工程技能素质。

(2) 为配合 21 世纪的教学改革,在实验中增加了可编程控制器 (PLC) 等高新技术的内容。

(3) 在保留原有教材基本内容的基础上,对传统的实验增加了一些新的内容。如三相电路中增加了二瓦计法及功率补偿,三相电机控制中加入时间控制和顺序控制等内容。

(4) 将《电路分析》与《电工学》的实验课程合并编写,满足了电专业与非电专业学生的不同需求。

本教材由太原理工大学李凤霞、陈惠英共同编写。陈惠英编写了第一章、第二章;李凤霞编写了第三章、第四章及附录部分。全书由太原理工大学渠云田教授主审,实验中心高级工程师李彩萍参与了部分章节的审阅。本书编写过程中,得到太原理工大学电工基础部领导李晓明老师及院领导的支持,一些老师和实验技术人员也对此提出了很多好的建议,编者在此一并表示深切的谢意。

编写实验教材是我们首次尝试,由于编者水平和经验有限,再加成稿时间仓促,书中难免会有不妥和错误之处,恳切希望读者,特别是使用该教材的师生提出批评和改进意见。

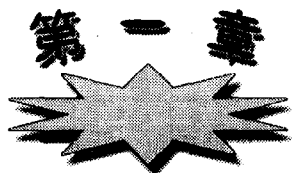
编 者

2002 年 1 月

前言

第一章 电路测试基本知识	1
第一节 实验须知和实验室安全用电规则.....	1
第二节 测量误差概述.....	3
第三节 测量中有效数字的处理.....	8
第四节 常用电工仪表的选用	10
第五节 安全用电知识	14
第二章 稳态电路与暂态电路的测试	21
第一节 常用电路元件的简易测试	21
第二节 元件特性的伏安测量法	25
第三节 元件特性的示波测量法	28
第四节 电路基本测量	31
第五节 叠加定理和互易定理	33
第六节 戴维南定理和诺顿定理	36
第七节 阻抗的测定	40
第八节 日光灯电路及其功率因数的改善	43
第九节 RLC 串联谐振电路	46
第十节 RC 电路的频率响应	49
第十一节 交流电路中的互感	53
第十二节 三相交流电路	57
第十三节 一阶 RC 电路的时域响应	61
第十四节 二阶电路过渡过程的研究	66
第十五节 冲激响应与正弦响应	71
第十六节 二端口网络参数的测定	74
第十七节 运算放大器和受控源	78
第十八节 电路的机辅分析 (一)	
——线性直流电路的节点分析	83

第十九节 电路的机辅分析 (二)	
——线性二阶电路动态过程的研究	87
第三章 变压器、异步电动机的继电接触器的控制电路	92
第一节 单相变压器	92
第二节 三相异步电动机的起动与调速	95
第三节 异步电动机直接起动与正反转的控制	98
第四节 顺序起动与行程控制	101
第五节 PLC 简易编程器的操作	105
第六节 PLC 基本指令的应用	113
第七节 PLC 的综合应用	119
第四章 常用电工测量仪表	124
第一节 电压表和电流表	124
第二节 功率表	133
第三节 万用表	137
第四节 直流稳压电源	140
第五节 示波器的基本原理和使用	142
第六节 信号发生器	152
第七节 调压器	154
第八节 晶体管毫伏表	154
附录 A 常用电路元件	157
参考文献	166



电路测试基本知识

第一节 实验须知和实验室安全用电规则

一、实验目的

(1) 学习常用电子仪器、仪表(包括万用表、直流稳压电源、低频信号发生器、晶体管毫伏表及示波器)的性能及工作原理,并学会其使用方法。

(2) 学习并掌握基本的测量方法。内容包括电流与电压的测量、阻抗的测量、元件伏安特性的测量、电路频率特性测量等。

(3) 培养初步的实验技能,包括正确选用仪器、仪表,制定合理的实验方案,对实验中各种现象进行正确的观察和判断,实验数据的正确读取、处理和误差分析,实验报告的编写等。

二、对实验技能的要求

(1) 正确使用电流表、电压表、万用表、功率表以及常用的一些电工实验设备;学会使用示波器、信号发生器、稳压电源等电子仪器。

(2) 按电路图连接实验线路并合理布线,能初步分析并排除故障。

(3) 认真观察实验现象、正确地读取数据并加以检查和判断,正确书写实验报告和分析实验结果。

(4) 正确运用实验手段来验证一些定理和结论。

三、实验进行方式

实验一般分课前预习、进行实验和课后作实验报告三个阶段。各个阶段的要求如下:

1. 课前预习

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。因此,要求在预习时仔细阅读实验指导书和其他参考资料,明确实验目的、内容,了解实验的基本原理以及实验电路,清楚实验中要观察哪些现象,记录哪些数据。

学生只有认真做好预习,才能到实验室做实验。预习不合格者,不得进行实验。

2. 进行实验

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。一般实验按照下列程序进行:

(1) 教师在实验前讲授实验要求及注意事项。

(2) 学生到指定桌位上做实验,先做好3件事:

1) 按设备清单清点设备。注意仪器设备的类型、规格和数量, 辅助设备是否齐全, 同时了解设备的使用方法。

2) 做好记录的准备工作。

3) 做好桌面的整洁工作。暂时不用的设备整齐地放在一边, 将仪器盖布、罩布叠放整齐。

(3) 接好实验线路。经自查无误并请教师复查同意后才能合上电源。

(4) 操作, 观察实验现象, 并读数, 记录和审查数据。

(5) 结尾工作: 完成全部规定的实验项目后, 先自己核查实验数据, 再经教师复查, 并在原始记录纸上签字通过后, 方可进行下列结尾工作:

1) 拆线。

2) 做好仪器设备、桌面和环境的清洁整理工作。

3) 经教师同意后方可离开实验室。

3. 实验报告

实验报告是实验工作的全面总结, 要用简明的形式将实验结果完整和真实地表达出来。报告要求文理通顺、简明扼要、图表清晰、结论正确、分析合理、讨论深入。

报告纸采用学校规定的格式, 实验报告除填好报告纸上各栏外, 一般应包括如下几项:

(1) 实验目的;

(2) 实验原理;

(3) 实验内容;

(4) 实验电路;

(5) 数据图表及计算示例;

(6) 实验结果的分析处理 (包括结论、分析讨论、收获体会);

(7) 问题回答。

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。

四、实验规则

(1) 严禁带电接线、拆线或改接线路。

(2) 接线完毕后, 要认真复查, 确信无误后, 经教师检查同意, 方可接通电源进行实验。

(3) 实验过程中如果发生事故, 应立即关断电源, 保护现场, 报告指导教师。

(4) 实验完毕后, 先由本人检查实验数据是否符合要求, 然后请教师检查, 经教师认可后才可拆线, 并将实验器材整理好。

(5) 室内仪器设备不准任意搬动调换, 非本次实验所用的仪器设备, 未经教师允许不得动用。没有看懂仪表、仪器及设备的使用方法前, 不得贸然使用。若损坏仪器、设备, 必须立即报告教师, 做出书面检查, 责任事故要酌情赔偿。

(6) 实验要严肃认真, 保持安静、整洁的学习环境。

五、实验室安全用电规则

安全用电是实验中始终需要注意的重要问题。为了做好实验, 确保人身和设备的安全

全，在做实验时，必须严格遵守下列安全用电规则：

(1) 接线、改接、拆线都必须在切断电源的情况下进行，即先接线后通电，先断电再拆线。

(2) 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或连接点等带电部位。万一遇到触电事故，应立即切断电源，进行必要的处理。

(3) 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、异声、冒烟、火花等，应立即断电，并请老师检查。

(4) 实验时应精神集中，同组者必须密切配合，接通电源前须通知同组同学，以防止触电事故。

(5) 电机转动时，防止导线、发辫、围巾等物品卷入。

(6) 了解有关电器设备的规格、性能及使用方法，严格按额定值使用。注意仪表的种类、量程和连接使用方法，例如不得用电流表或万用表的电阻、电流档去测量电压，功率表的电流线圈不能并在电路中等等。

第二节 测量误差概述

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叫做测量误差。

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（如温度、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可分为：

(1) 基本误差：基本误差是仪表在正常使用条件下，由于结构上和制造中的缺陷而产生的误差，它为仪表所固有。其主要原因是仪表的活动部分在轴承中的摩擦、游丝的永久变形、零件位置安装不正确、刻度不准确等等。

(2) 附加误差：它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条件下使用，例如温度和磁场的变化、放置方法不同等。

(3) 方法误差：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，间接测量时近似计算公式等等，都可能造成误差，所有这些误差都叫做方法误差。

2. 偶然误差

这种误差是由于某些偶然因素所造成的。这些因素产生的原因或是由于目前还不知道，或者还无法掌握。例如同一电桥对同一电阻进行多次测量，其结果都可能不一样，有的偏大，有的偏小，看起来好象没有什么规律，但把多次测量结果综合起来看，仍是有规律的，由数学理论可知它符合统计规律。

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、计算错误或操作方法错误等所造成的误差。

二、减小或消除误差的方法

测量的目的就是要尽可能求出被测量的实际值，为达到此目的必须设法减小或消除测量误差。

1. 减小系统误差的方法

(1) 对仪表进行校正，在测量中引用更正值，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。例如替代法，在保持仪表读数不变的条件下，用等值的已知量去代替被测量，这样的测量结果就和测量仪表的误差、外界条件的影响无关。具体地说，比如用电桥测量电阻，先用电桥测量被测电阻，调节桥臂电阻使电桥平衡。然后以标准电阻箱代替被测电阻，调节标准电阻使电桥平衡，这时标准电阻箱上的读数就是被测电阻的阻值。

2. 减小偶然误差的方法

从统计学规律看，把同一测量重复多次，取其算术平均值作为被测量的值，即可减小偶然误差，测量次数越多，偶然误差越小；测量次数趋于无穷大，则偶然误差趋于零。

3. 消除疏忽误差的方法

由于疏忽误差是明显的错误，比较容易发现，测量后要进行详细的分析。凡是由于疏忽所测量的数据都应抛弃，因为它是不可信的。

三、测量误差的表示方法

1. 绝对误差

测量值 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，读得标准表的指示值为 50V。甲表读数为 51V，乙表读数为 49.5V，求它们的绝对误差。

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

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

可见，绝对误差有正负之分，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。另外，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。

所谓准确度，就是与实际值接近的程度。与实际值越接近，准确度越高。从而可以看出，仪表的准确度越高，测量结果越准确。

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其准确度，例如，甲表测 100V 电压时，绝对误差 $\Delta_{甲} = +1\text{V}$ ，乙表测 10V 电压时，绝对误差 $\Delta_{乙} = +0.5\text{V}$ ，从绝

对误差来看, 甲表大于乙表。但从仪表误差对测量结果的相对影响来看, 却正好相反, 因为甲表的误差只占被测量的 1%, 而乙表的误差却占被测量的 5%, 即乙表误差对测量结果的相对影响更大, 所以在工程上通常采用相对误差来衡量测量结果的准确度。相对误差就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

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

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

解: 甲表的相对误差 $\gamma_{\text{甲}} = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% = \frac{+2}{100} \times 100\% = +2\%$

乙表的相对误差 $\gamma_{\text{乙}} = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% = \frac{-1}{20} \times 100\% = -5\%$

可以看出, 甲表的准确度高于乙表的准确度。

四、仪表的准确度等级

仪表的基本误差是它本身所固有的。基本误差越小, 测量所引起的这一方面的误差就越小, 测量就越准确。

所谓仪表的准确度就是仪表在正常工作条件下, 仪表全量程范围内的最大绝对误差 ($|\Delta_m|$) 与该量程 (A_m) 之比的百分数值, 即

$$\pm K = \frac{|\Delta_m|}{A_m} \times 100\% \quad (1-3)$$

按国家标准规定, 仪表的准确度共分为 7 级, 如表 1-1 所示。

表 1-1 仪表的准确度分级

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】 用 0.5 级、0~10V 的电压表和 0.2 级、0~100V 的电压表测量 8V 电压, 问哪一块表测量的准确度高?

解: 用 0.5 级、0~10V 电压表测量, 可能出现的最大绝对误差为

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

可能出现的最大相对误差

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

用 0.2 级、0~100V 电压表测量, 可能出现的最大绝对误差为

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

可能出现的最大相对误差为

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

从计算结果可以看出, 用 0.5 级、0~10V 的电压表测量的准确度高。

由此看出,测量的准确度既取决于仪表的准确度,又取决于仪表的量程。被测量的值越接近满量程,测量准确度就越高。因而在测量时,除正确选择仪表的准确度等级外,还应正确选择仪表的量程。通常被测量值为满量程的 $\frac{2}{3}$ 以上较为合适。

五、工程上对测量误差的估算

在任何测量过程中,误差总是存在的。因此在测量工作完成以后,不仅要确定测量结果的数值,而且还要确定测量结果的准确程度。在工程测量中,由于疏忽误差是一个错误的测量结果,当然应当舍去,因而在误差估算中不加以考虑。在测量中我们所取的测量结果一般都是多次测量的算术平均值,偶然误差与系统误差相比较,偶然误差对测量结果的影响很小,故可略去不计,所以在工程测量中只考虑系统误差的影响。下面分别讨论直接测量和间接测量中系统误差的估算方法。

1. 直接测量中系统误差的估算方法

系统误差包含仪表的基本误差、附加误差和方法误差,所以测量中的最大误差等于上述误差之和。

(1) 仪表基本误差的估算方法:根据仪表的准确度等级和所选的量程来计算。设在测量中所使用的仪表准确度为 a 级,选用的量程为 A_m ,测量的读数为 A_x ,则测量结果可能出现的最大相对误差为

$$\gamma_m = \pm \frac{a \cdot A_m}{A_x} \times 100\% \quad (1-4)$$

这里需要说明的是,前面我们说的相对误差是指绝对误差与被测量的实际值之比。这里我们用的是测量的读数 A_x ,而不是被测量的实际值 A_0 。由于被测量的实际值和仪表的指示值相差不大,所以在工程上当不能确定实际值 A_0 时,常用仪表的指示值 A_x 近似地代替 A_0 进行计算。

【例 1-4】 现有一电流表测量电流,仪表的准确度为 1.5 级,量程为 30A,其读数为 20A,试求由于仪表结构不完善所引起的基本误差。

解:利用式 (1-4) 可求得

$$\gamma_m = \pm \frac{a \cdot A_m}{A_x} \times 100\% = \pm \frac{1.5\% \times 30}{20} \times 100\% = \pm 2.25\%$$

(2) 仪表附加误差的估算方法:由于附加误差起源于工作条件的变化,所以保证仪表在规定的正常条件下使用,附加误差即可消除。如果仪表的使用不符合所规定的正常条件,则所引起的附加误差按表 1-2 计算。

例如在 [例 1-4] 中,规定的工作温度为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$,而测量时的工作温度为 30°C ,可见超出了所规定的温度范围,但小于 10°C 。由表 1-2 可知,在测量中所出现的附加误差等于基本误差,即 $\pm 2.25\%$ 。因而在这种情况下测量,总的最大误差为上述两种误差之和,即 $\pm (2.25 + 2.25)\% = \pm 4.5\%$ 。

(3) 方法误差的估算方法:方法误差是由于测量方法不完善或因计算公式近似而引起的。如果需要考虑时,应根据具体情况进行分析计算。

表 1-2

根据工作条件的变化计算附加误差

工作条件的变化	变 化 规 定	附加误差
工作位置倾斜角	自规定的工作位置向任一方向倾斜角 (0.5~1.0 级) 变化 20°	等于基本误差
工作温度	环境温度自额定温度变化, 每变化 10℃	
工作频率	自额定频率变化 $\pm 10\%$ (对单相相位表为 $\pm 2\%$, 对单相无功功率表为 $\pm 5\%$)	
工作电压	工作电压自额定值偏离 $\pm 10\%$ (对比率表)、 $\pm 15\%$ (对整流式仪表)、 $\pm 20\%$ (对其他仪表)	
辅助电源的电压和功率	电压自额定值偏离 $\pm 10\%$, 频率自额定值偏离 $\pm 2\%$	等于基本误差的一半

2. 间接测量中系统误差的估算方法

在间接测量中, 被测量是通过直接测量量的计算而得到的, 因而测量误差与直接测量量的误差有关。

现假设被测量 y 与直接测量量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 满足关系式

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1-5)$$

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

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \frac{\partial f}{\partial x_3} dx_3 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n \quad (1-6)$$

其相对误差为

$$\gamma_y = \frac{dy}{y} = \frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \frac{dx_1}{y} + \frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \frac{dx_2}{y} + \frac{\partial f}{\partial x_3} \cdot \frac{dx_3}{y} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \cdot \frac{dx_n}{y} \quad (1-7)$$

式中, $dx_1, dx_2, dx_3, \dots, dx_n$ 分别为各直接测量量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 的测量所含的绝对误差。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 $y = Ax_1 + Bx_2$

$$\text{则} \quad dy = A dx_1 + B dx_2 \quad (1-8)$$

$$\gamma_y = A \frac{dx_1}{y} + B \frac{dx_2}{y} = A \frac{x_1}{y} \cdot \frac{dx_1}{x_1} + B \frac{x_2}{y} \cdot \frac{dx_2}{x_2}$$

$$\text{所以} \quad \gamma_y = A \frac{x_1}{y} \gamma_{x1} + B \frac{x_2}{y} \gamma_{x2} \quad (1-9)$$

式中, γ_{x1}, γ_{x2} 分别为直接测量量 x_1, x_2 的相对误差。

在最不利的情况下, 最大误差将发生在各直接测量的误差符号相同时, 所以估算误差时, 对式 (1-8)、式 (1-9) 各项均取绝对值, 即

$$|dy| = |A dx_1| + |B dx_2| \quad (1-10)$$

$$|\gamma_y| = \left| A \frac{x_1}{y} \gamma_{x1} \right| + \left| B \frac{x_2}{y} \gamma_{x2} \right| \quad (1-11)$$

(2) 被测量为直接测量值之差。设 $y = Ax_1 - Bx_2$

$$\text{则绝对误差为} \quad dy = A dx_1 - B dx_2$$

相对误差为

$$\gamma_y = A \frac{x_1}{y} \gamma_{x1} - B \frac{x_2}{y} \gamma_{x2}$$

从最严重的情况考虑,最大误差发生在两直接测量误差符号相反时,其数值用绝对值表示

$$|dy| = |A dx_1| + |B dx_2| \quad (1-12)$$

$$|\gamma_y| = \left| A \frac{x_1}{y} \gamma_{x1} \right| + \left| B \frac{x_2}{y} \gamma_{x2} \right| \quad (1-13)$$

这里必须指出,当两个直接测量值很接近时,其差值很小,因而此时被测量的相对误差就会达到很大,导致测量结果完全失去意义,在实际工作中应尽量避免采用此类测量方法。

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

n 、 m 、 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

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

故相对误差为

$$|\gamma_y| = |n \gamma_{x1}| + |m \gamma_{x2}| + |p \gamma_{x3}| \quad (1-14)$$

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,非采用间接测量不可时,对所需的直接测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,都要认真选择,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。

六、思考题

(1) 什么叫做测量误差? 测量误差的表达式有几种? 误差有几种类型? 各是怎样产生的? 应如何减小或消除这些误差?

(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?

第三节 测量中有效数字的处理

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,它涉及到有效数字和计算规则的问题。

一、有效数字的概念

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。末位数字是估计出来的,比如指针指在两条刻度线之间时,读数是不准确的。例如:用一块 50V 的电压表(每小格为 1V)测量电压时,指针指在 32V 和 33V 之间,

可读取 32.4V, 其中数字“32”是准确可靠的, 称为可靠数字, 而最后一位“4”是估计出来的不可靠数字, 称为欠准数字, 两者结合起来称为有效数字。对于“32.4”这个数字, 有效数字是三位。

对可疑数字的解释, 目前有两种, 在无特殊规定的情况下, 允许被测量的实际值在可疑数字位置上有 ± 0.5 或 ± 1 个单位的变动。比如, 32.4V 所代表的电压, 可以认为它的实际值在 32.35~32.45 之间, 也可以认为实际值在 32.3~32.5V 之间。

有效数字位数越多, 测量准确度越高。如果条件允许的话, 能够读成“32.40”, 就不应记为“32.4”, 否则降低了测量准确度。反过来, 如果只能读作“32.4”, 就不应记为“32.40”, 后者从表面来看, 提高了测量准确度, 但是实际上小数点后面的第二位是不准确的, 因为小数点后第一位就是估计出来的可疑数字, 第二位就没有什么意义了。在读取和处理数据时, 有效数字的位数要合理选择, 使所取的有效数字的位数与实际测量的准确度一致。

二、有效数字的正确表示法

(1) 记录测量数值时, 只允许保留一位可疑数字。

(2) 数字“0”在数中可能是有效数字, 也可能不是有效数字。例如 0.0415kV, 前面的两个“0”不是有效数字, 它的有效数字是三位。0.0415kV 可以写成 41.5V, 它的有效数字仍然是三位, 可见前面的两个“0”仅与所用单位有关。又如 30.0V 有效数字是三位, 后面两个“0”都是有效数字。必须注意末位的“0”不能随意增减, 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, 测得其电阻的阻值是 15000 Ω , 有效数字为三位, 则记为 $1.50 \times 10^4 \Omega$ 或 $150 \times 10^2 \Omega$, 不能记为 15000 Ω 。

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

三、有效数字的修约规则

当有效数字位数确定后, 多数的位数应一律舍去, 其规则为:

(1) 被舍去的第一位数大于 5, 则舍 5 进 1, 即末位数加 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, 即末位数加 1, 例如把 0.6501 修约成小数点后一位数, 结果为 0.7。

(4) 被舍去的第一位数等于 5, 而 5 之后的数全为 0, 视前面的数字而定, 5 前面为偶数, 则只舍不进, 即末位数不变; 5 前面为奇数, 则舍 5 进 1, 即末位数加 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。

四、有效数字的运算规则

处理数据时, 常常需要运算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、0.056 和 1.666 相加，小数点后最少位数是一位（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

参加运算的数据，数值相差较大时，运算规则与加法运算相同。如果两数相差很小，运算后将失去若干位有效数字，致使测量结果误差很大，这是要避免的。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、1.057 和 23.41 相乘，有效数字最少的是二位（0.12），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，也可多保留一位有效数字，即

$$0.12 \times 1.06 \times 23.4 = 2.97648$$

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

$$(25.6)^2 = 655.4$$

$$\sqrt{4.8} = 2.19$$

5. 对数运算

取对数前后的有效数字位数相等。

例如：

$$\ln 106 = 4.66$$

$$\lg 7.564 = 0.8788$$

第四节 常用电工仪表的选用

电工仪表就是测量各种电气参数，如电压、电流、功率、电能、电阻和频率等的仪表。电工仪表不仅可以直接测量电量，而且通过转换，还可以间接测量许多非电量，如磁通、温度、应力、振动等。

一、电工仪表的分类

(1) 按照所采用的测量方法，电工仪表可分为直读仪表和比较仪器。比较仪器是将被测量与标准度量器加以比较而确定被测量大小的仪器。直读仪表直接显示被测量的大小，它又分为模拟式和数字式两类。模拟式仪表的使用十分广泛，它对被测量进行连续测量，

用指针在刻度盘上的位置表示被测量的大小；数字式仪表则是以离散的数字来显示被测量的。一般来说，数字仪表比模拟仪表有更高的精度，价格亦较高。虽然数字仪表的应用范围正在不断扩大，模拟仪表作为基本的测量仪表，仍是电工仪表中最常见、应用最广泛的一类仪表。模拟式电工仪表大多是机电式的，它是利用电流流过导体产生磁场，从而使指针偏转的原理制成的。

(2) 按照被测量的性质不同，电工仪表可分为电压表、电流表、功率表、欧姆表、电度表、相位表、频率表等。

(3) 按照工作原理的不同，电工仪表可分为磁电系、电磁系、电动系、感应系、整流系、静电系等。

(4) 按照所测电量种类的不同，电工仪表可分为直流表、交流表和交直流两用仪表。

(5) 按照装置方法的不同，电工仪表又可分为配电盘式仪表（又称开关板式仪表或板式表）和携带仪表。

(6) 按照仪表的准确度等级，电工仪表又可分为 0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 几个等级。

表 1-3 给出了电工仪表表盘上常见的一些标志符号。

表 1-3 常用电工仪表的标志符号

分类	符 号	名 称	分类	符 号	名 称
电流种类	—	直流表	作用原理		磁电系仪表
	~	交流表			电磁系仪表
	~ ~	交直流表			电动系仪表
	≡	三相交流表			整流系仪表
测量对象	Ⓐ	电流表	工作位置	—	水平使用
	Ⓥ	电压表		┌	
	Ⓦ	功率表			垂直使用
	kWh	电度表		⊥	
准确度	0.5	0.5 级	绝缘试验		试验电压 2kV
	0.5				