

中等专业学校试用教材

电工基础实验

吴涛 主编

33

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是根据国家教委1987年3月颁发的中等专业学校电工类专业《电工基础实验教学大纲》编写的,供中专电工类专业《电工基础实验》单独设课教学使用,也可供电工类技工学校教学参考。

全书共编入实验二十八个,包括了直流电路、单相正弦交流电路、互感电路、三相正弦交流电路、周期性非正弦交流电路、过渡过程、磁路等各方面的实验内容。有关电工测量和电工仪表的理论知识,分散在直流量的测量、交流电压和电流的测量、功率和电能的测量、磁测量几个部分和相应实验一起编写,在各个部分适当集中。为了便于利用,一些常用电工实验设备的使用简介,以附录形式编排在初次使用它的实验后面。

全书按照先直流后交流和循序渐进的原则安排教学内容。全书共分为电工测量和仪表的基本知识、直流电路实验、正弦电压和电流的测量、功率和电能的测量、非正弦交流电路和一阶电路的研究、磁的测量等六章。内容上注意突出实践性和通用性,并便于和《电工基础》课程相互配合和衔接。

中等专业学校试用教材

电 工 基 础 实 验

吴 涛 主编

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

商务印书馆上海印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 8.5 字数 192,000

1989年4月第1版 1989年6月第1次印刷

印数 0001—10,900

ISBN 7-04-002043-2/TM·122

定价 1.90 元

前 言

为了大力加强实践性教学环节,培养中级应用型人才,国家教委于1987年3月颁发了全国中等专业学校电工类专业《电工基础实验》课程教学大纲,并要求各学校积极创造条件,争取在3~5年内做到电工基础实验单独设课。在全国中专电工基础课程组的具体指导和帮助下,我们以《电工基础实验》教学大纲为依据,在认真总结几年来电工实验单独设课的经验基础上编写了这本《电工基础实验》教材。

在编写过程中力求做到能有效地培养学生的电工实验基本技能以及应用电工基础理论分析和解决实际问题的能力,使学生正确掌握中级电工技术人员所必须具备的电工测量和电工仪表的常识,巩固和加深《电工基础》课程中所学到的理论知识,培养理论联系实际、实事求是、严肃认真的作风。

本书按照先直流后交流和循序渐进的原则安排教学内容。对于电工测量和电工仪表的理论知识,将它们分散为直流量的测量、交流电流和电压的测量、功率和电能的测量、磁测量几个部分和有关实验一起编写,在各个部分又适当加以集中。这样做,便于和《电工基础》课程的理论教学相互配合和衔接,更重要的是,使每一个具体的电工实验都有足够的电工基础理论知识和电工测量理论知识作为基础,学生通过实验中的一系列实践活动,能较快地把理论知识转变为实际能力。

全书共编入实验28个,包括了直流电路、单相正弦交流电路、互感电路、三相正弦交流电路、周期性非正弦交流电路、过渡过程、磁路等各方面的实验内容。实验内容的编排,努力做到先易后难。头一、二个实验,实验步骤写得详尽些,先让学生按规定的实验线路、电路参数进行实验,然后逐渐放手,适当的时候安排一个由学生自拟方案并独立完成的实验,使学生经历一次综合应用实验技能和理论知识的训练。

为了便于利用,一些常用的电工实验设备的使用简介,以附录的形式编排在初次使用它的实验后面。

除了一般教材都应具备的科学性、思想性、启发性和适用性之外,由于《电工基础实验》课程是以实验为主的技术基础课,所以在本书的编写过程中,我们注意适当淡化理论知识,避免繁琐的教学推证,突出实践性。凡是实验中用不着的电工测量和电工仪表的理论知识,我们都舍去了。有不少电工测量和电工仪表的常识,是结合具体的实验传授给学生的。

编写本书的过程中,我们还尽量注意了教材的通用性。编入教材的实验中,大约有80%的实验很容易为各个学校套用,大约15%的实验,经另行选配参数后,也能在大多数学校进行。考虑各校的具体情况不同,有少数实验还编写了两种实验方案,可以任选其中的一种方案。此外,书中标有“*”的理论知识或实验内容,是供选学或选作的。

由于各校实验室的设备条件不同,本书没有编入实验电路的故障分析与排除这方面的实

验项目。各校可以根据各自的情况,适当选编补充讲义,满足本部门或学校的特殊需要。

实验内容部分,有关仪表设备的型号、规格以及实验电路的参数等,我们以方括号的形式提供了参考数据。能按这些参考数据进行实验自然很好。如果由于条件所限,无法应用参考数据,则由教师根据实际情况自行另外定出有关数据,并在布置预习实验时告诉学生。即使在后一种情况下,教材的主体部分仍然可以利用。

和其他任何教材一样,使用本书时,教师需要组织和安排教学内容。教材编写的先后顺序不一定就是教学的先后顺序。我们建议先用四学时的时间讲授绪论、仪表的误差与准确度、磁电系仪表、欧姆表,之后就开出直流电路的认识实验以及测定电阻和电源伏安特性的实验,接着再讨论测量误差及其粗略估计,避免《电工基础实验》一开头就停留在理论教学上。使用本教材时要注意根据突出实践性以及努力和《电工基础》课程相互配合、相互衔接的原则安排教学顺序。

本书的第四章、第五章、第六章由上海电机制造技术专科学校吴兴云执笔,其余部分由重庆电力学校吴涛执笔,吴涛主编。

本书由全国中专电工基础课程组成员、上海电机制造技术专科学校袁兆熊老师主审。1988年4月在北京召开的全国中专电工基础课程组扩大会议上审稿通过。参加审稿会议的有南京无线电工业学校的李树燕老师和李明章老师、内蒙古电力学校的丁道鹏老师、西安航空工业技术专科学校的曹彦芳老师、广东省邮电学校的区嘉雄老师、南京电力专科学校的张洪让老师等。他们提出了不少宝贵意见,对修改定稿起了重要作用。课程组成员、重庆电力学校的张步滋老师审阅了部分书稿,给了不少帮助。在此,编者谨表示深切的谢意。

本书的编写过程中,借鉴了许多兄弟学校电工实验教学的经验。1987年12月在重庆召开的全国中专电工实验教学经验交流大会,对编写指导思想的确立起了决定性的作用。此外,上海海运学校的张呈祥老师为磁测量实验提供了大量资料。借教材出版的机会,编者向全国的同行致意。

由于编者水平有限,参加电工实验单独设课的教学实践时间不长,加上编写时间又相当短促,书中难免有不当之处,恳请广大师生批评指正。

编 者

1988年5月

目 录

绪论	1	实验十二 RLC 串联谐振电路	75
第一章 电工测量与仪表的基本知识	4	*附录 电动系单相功率因数表的使用简介	78
§ 1-1 指示仪表的误差与准确度	4	*实验十三 线圈和电阻串联后再与电容并联的 正弦电路	78
§ 1-2 电工测量及测量误差的粗略估计	6	实验十四 星形负载的三相电路	80
§ 1-3 指示仪表的分类和表面标记	11	附录 三相调压器的使用简介	82
第二章 直流电路实验	14	实验十五 三角形负载的三相电路	82
§ 2-1 磁电系电流表和电压表	14	实验十六 自拟实验方案测定互感线圈的同名 端及互感系数 M	84
§ 2-2 测量直流电流和电压的实验	17	*§ 3-7 电流表和电压表的选择	84
实验一 直流电路的认识实验	17	第四章 功率和电能的测量	87
附录 晶体管直流稳压电源使用简介	20	§ 4-1 电动系功率表	87
实验二 电阻和电源伏安特性的测定	21	*§ 4-2 三相电路的功率测量	90
附录 滑线电阻的使用简介	23	§ 4-3 感应系电度表	94
实验三 验证 KCL 和 KVL	24	§ 4-4 测量功率和电能的实验	97
附录 转臂式电阻箱及电流插座板的使用简介	26	实验十七 日光灯电路	97
*实验四 实际电源两种电路模型的研究	28	附录 日光灯简介	99
附录 一种自制的晶体管直流稳压电源	30	实验十八 测量三相电路的功率	100
§ 2-3 直流电阻的测量	30	*实验十九 单相电度表的认识实验	102
§ 2-4 测量直流电阻的实验	41	§ 4-5 交流电路的综合实验	104
实验五 直流单双臂电桥和兆欧表的初步使用	41	实验二十 线圈参数的测量	104
实验六 伏安法测电阻	44	*实验二十一 万能电桥的使用	104
§ 2-5 直流电路综合实验	46	附录 Q818A 型万能电桥的使用简介	105
实验七 自拟实验方案验证戴维南定理	46	第五章 非正弦交流电路和一阶电路的研究	109
实验八 电流表和电压表的扩大量限	47	实验二十二 电解电容器的粗测	109
第三章 正弦电压和电流的测量	51	实验二十三 周期性非正弦电压的分解	110
§ 3-1 整流系仪表	51	实验二十四 电压表的选用	113
§ 3-2 万用表	53	实验二十五 一阶 RC 电路的研究	115
§ 3-3 电磁系电流表和电压表	54	第六章 磁的测量	119
§ 3-4 钳表简介	56	§ 6-1 磁测量的简介	119
§ 3-5 电动系电流表和电压表	57	§ 6-2 磁测量实验	121
§ 3-6 正弦电路实验	60	实验二十六 交流铁心线圈	121
实验九 正弦电路的认识实验	60	实验二十七 $B-H$ 曲线的测定	123
附录 单相调压器及试电笔的使用简介	62	*实验二十八 用示波器观察交流磁滞回线	126
实验十 R 、 L 、 C 的频率特性	63	总附录 电工实验室主要仪器设备	128
附录 低频信号发生器及晶体管(电子管)电 压表使用简介	65	主要参考书目	130
实验十一 用电子示波器观测信号波形	69		
附录 电子示波器及其使用简介	70		

绪 论

电工实验课是一门着重培养学生掌握电工实验基本技能以及应用电工基础理论分析解决实际问题能力的技术基础课。

一、电工实验课的目的

(1) 进行电工实验基本技能的训练。通过电工实验,学会使用各种常见的电工仪表以及常用的电工实验设备,按电路图正确接线,认真观察实验现象,正确处理实验数据、分析实验结果和写出实验报告。

(2) 理论联系实际,培养分析和解决实际问题的能力,巩固和加深所学到的电工基础理论知识。

(3) 获得电工测量和电工仪表的常识。

(4) 培养实事求是、严肃认真的科学作风和良好的实验习惯。

二、电工实验课的进行方式

为了使电工实验课能获得预期的效果,进行电工实验时,要做到课前认真预习,课上认真实施实验,课后认真完成实验报告。

(一) 预习

预习时要仔细阅读实验指导书,复习有关理论,明确实验的目的和要求,了解实验原理、线路、方法和步骤,对实验中要观察哪些现象、记录哪些数据、注意哪些事项做到心中有数。

实验能否顺利进行和富有成效,很大程度上取决于预习是否充分。因此,没有预习者不得进行实验。

(二) 实施实验

1. 准备工作

学生到实验室后,应先认真听取指导教师对本次实验的说明,然后到指定的桌位做好以下准备工作:

(1) 清点仪表设备。要注意记录仪表的类型、规格和编号,了解它们的使用方法,检查指针该指零的仪表是否指零。

(2) 作好本组同学之间接线、操作、记录、监护等项工作的分工,并注意在各次实验中适当轮换。

2. 连接实验线路

接线应该在断开电源的情况下进行。接线时,应按照电路的结构特点,先连接主要的串联电路,然后再连接上分支电路。遇到复杂一些的电路时,可先把电路分成较简单的几个组成部分,把各组成部分分别接好后,再依次将它们连成最后的电路。

所有仪表设备的布局及布线,要尽量做到安全、方便、整齐和减少相互影响。接线应牢

靠, 接线接头不宜过分集中于某一点, 仪表端钮上非不得已不接两根以上的连线。将图 0-1(a) 所示的原理电路, 接成实际的实验线路, 图(b) 表示接线较合理的情形, 而图(c) 则表示接线欠合理的情形。

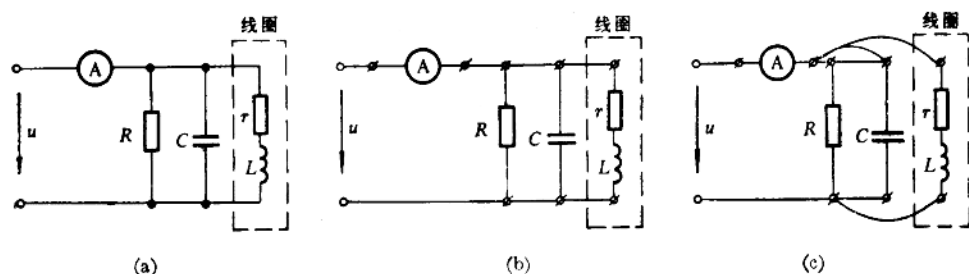


图 0-1

3. 接通实验电源

实验线路要经接线者自查和同组同学的互查, 一些复杂的实验线路还要经过指导教师的复查, 确认无误或不会导致人身设备事故后, 方可接通电源。

接通电源时要眼观全局, 注意观察仪表设备所发生的现象。若无异常, 再读取实验数据。

4. 操作、观察和记录

操作前要做到心中有数, 目的明确。操作要胆大心细, 并同时认真观察实验现象。

实验现象和实验数据应正确、完整、清晰地记录在事先准备好的表格内。

有的实验操作比较复杂, 读取的实验数据又比较多。此时, 同组同学之间要分工明确, 又要注意相互配合。

5. 扫尾工作

完成规定的全部实验项目, 根据所学理论知识和实验要求, 自查实验记录是否合理和完整, 之后方可拆线, 并做好仪表设备的整理及环境清洁工作。

(三) 编写实验报告

实验报告是实验工作的全面总结, 要用简明的形式将实验情况完整、真实地表达出来。实验报告应字迹端正、图表清晰、分析合理、讨论深入、结果正确。

完整的实验报告一般应包括以下内容:

- (1) 实验日期、班级、组别、实验者的姓名和学号;
- (2) 实验目的;
- (3) 实验仪表设备的名称、型号、主要规格和编号;
- (4) 实验任务、实验原理、实验电路图和实验步骤;
- (5) 数据图表及分析计算示例;
- (6) 实验结论或问题讨论。

三、电工实验安全规则

为确保仪表设备和人身的安全, 学生进入实验室后一定要遵守电工实验安全规则,

- (1) 进行实验时要严肃认真, 不做与规定实验无关的事。

(2) 分清实验室的直流电源和交流电源,了解它们各自的电压、电流额定值,对直流电源还要区分其正负极。

(3) 对实验仪表设备,在未弄清其使用方法之前,不得使用。使用时,要轻拿轻放、放置稳妥。未经教师许可,不得拆卸仪表部件。

(4) 实验线路接好后,应经过认真自查及互查,并通知全组人员知道后,才能接通电源。

(5) 实验中不得用手触摸带电部分。改接线路及拆线应在断开电源、电容器放电后进行。

(6) 每次实验都应先试投电源,然后再正式进行测试,实验室所用电源多数是可调的,实验电压应从零开始逐步调至所需数值,同时注意观察仪表指示是否正常,有无声响、冒烟、焦臭等异常现象。一旦发生异常应立即切断电源,报告指导教师,然后根据现象分析查找原因,待故障消除后重新接通电源。

(7) 操作前应规划好步骤,不能盲目乱动。实验中应按实验指导书或教师指定的数值,调节电压、电流或其他参数。

(8) 未经允许,不得改动实验室的配电板和更换保险丝。

(9) 实验完毕后应随即切断电源。

四、故障的检查和处理

实验中会遇到因断线、接错线等原因造成的故障,使电路工作不正常,严重时还会损坏仪表设备和危及人身安全。

若实验电路出现严重短路或其他可能损坏仪表设备的故障时,应立即切断电源,根据现象进行分析,找出故障原因。一般可以先复查接线是否正确。

检查电路故障,还可利用电压表或欧姆表。

1. 电压表法

若故障不严重,可以降低电源电压,然后用电压表测量可能产生故障的各部分电压,根据电压的大小和有无,一般可找出故障处。例如,单个电源作用的无分支电阻电路,电流表无指示,我们不难判断有电阻器或连接导线断线。这时,可用电压表去测量各电阻器和各段导线的端电压,电压为零者完好,否则就是断线处。

2. 欧姆表法

断开电源的情形下,还可利用欧姆表检查各电阻器件是否完好,无源支路是否连通,连接导线是否断线,导线连接处接触是否良好。

第一章 电工测量与仪表的基本知识

§ 1-1 指示仪表的误差与准确度

电工实验中能把被测电量转换为机械位移,从而直接指示被测量大小的电工仪表,叫做电测量指示仪表,简称指示仪表(也叫做指针式仪表)。由于指示仪表具有结构简单、维修方便以及价格低廉等一系列优点,它们在生产实际和教学、科研中,都得到广泛的应用。

一、仪表的误差及其分类

任何仪表的指示值,与加在该仪表上的被测量的实际值(又称真值)之间总存在着差异,这个差异称为仪表的误差。例如,直流电流表的指示值与通过该电流表电流的实际值之间的差异,便是这只电流表的仪表误差。

根据引起误差的原因,可将仪表误差分为基本误差和附加误差两类。

1. 基本误差

指示仪表在规定的正常工作条件下进行测量时所具有的误差,叫做基本误差。这里所谓仪表的正常工作条件主要是指:

- (1) 指针该指零的应调到零点;
- (2) 仪表按规定的工作位置放置;
- (3) 仪表在规定的温度、湿度下工作;
- (4) 除地磁场外,没有超过规定强度的外来电磁场;
- (5) 对于交流仪表,波形为正弦波,频率在规定的范围内。

仪表的基本误差是由于结构上、制作上的不完善等本身固有的原因产生的。

2. 附加误差

附加误差是除上述基本误差外,仪表不在规定的正常工作条件下测量所出现的误差。

二、仪表误差的表示方法

1. 绝对误差 Δ

绝对误差是指示值 A_x 与实际值 A_0 之差,即

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

实际值 A_0 是我们事先不知道的,工程上可由标准表(用来检定工作仪表的误差很小的仪表)的指示值来近似。绝对误差与被测物理量有相同的单位。一般来说,仪表指针在标度尺(以后简称标尺)不同位置时,具有不同的绝对误差,其中有个最大绝对误差 Δ_m 。

2. 相对误差 γ

绝对误差与实际值之比的百分数为相对误差,即

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

相对误差较好地反映了误差对测量结果的影响程度,是误差最常用的表示形式。很明显,相对误差是个纯数。

3. 最大引用误差 γ_{nm}

仪表标尺工作部分所出现的最大绝对误差 Δ_m 与仪表量程(又称量程) A_m 之比,称为仪表的最大引用误差,即

$$\gamma_{\text{nm}} = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \quad (1-3)$$

三、指示仪表的准确度等级

误差说明了指示值与实际值之间的差异程度,而准确度则说明它们之间的符合程度。误差越小,准确度就越高。

国家标准(《电测量指示仪表通用技术条件》,代号为 GB 776-76)规定,用最大引用误差来表示仪表的准确度,即仪表在规定的工作条件下使用,允许的最大引用误差不大于仪表准确度 K 的百分数,其关系式为

$$K\% \geq \frac{|\Delta_m|}{A_m} \times 100\% \quad (1-4)$$

可见,仪表的准确度反映仪表的基本误差。根据国家标准规定,指示仪表的准确度共分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 等七个等级,如表 1-1 所示。

表 1-1

仪表的准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
仪表的基本误差 (以最大引用误差表示)	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.0\%$	$\pm 1.5\%$	$\pm 2.5\%$	$\pm 5.0\%$

在规定的正常工作条件下,我们使用指示仪表进行测量,如果仪表的量限 A_m 和准确度 K 已知,则在极限的情况下,仪表允许的最大绝对误差 Δ_m 的范围为

$$\Delta_m = \pm K\% \cdot A_m$$

由此可以求出使用该仪表测量某一物理量,指示值为 A_x 时可能出现的最大相对误差

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

应该指出,当利用式(1-3)、(1-4)、(1-5)分析误差时,仪表的标尺特性不同,应代入的 A_m 的值应不同。例如,单向标尺的仪表,应代入标尺工作部分上量限的值;双向标尺的仪表,应代入标尺工作部分两个上量限绝对值的和……,需要时可查 GB 776-76。

例 1-1-1 分别用量限为 100mA、准确度为 0.5 的毫安表和量限为 10mA、准确度为 2.5 的毫安表在规定的正常工作条件下去测量实际值为 9mA 的电流。求两次测量可能产生的最大绝对误差和相对误差(仪表内部的影响略去不计)。

解: 第一只毫安表测量时

$$\Delta_{m1} = \pm 0.5\% \times 100 = \pm 0.5 \text{ mA}$$

$$\gamma_{m1} = \frac{\pm 0.5}{9} \times 100\% \approx \pm 6\%$$

第二只毫安表测量时

$$\Delta_{m2} = \pm 2.5\% \times 10 = \pm 0.25 \text{ mA}$$

$$\gamma_{m2} = \frac{\pm 0.25}{9} \times 100\% \approx \pm 3\%$$

从式(1-5)和例 1-1-1 可以看出, 仪表的准确度对测量结果的准确程度(可用测量结果的相对误差表示)影响很大。然而, 即使在规定的正常工作条件下使用, 仪表的准确度并非就是仪表指示值的准确度。后者还与被测量的大小有关, 只当仪表应用于满刻度时, 指示值的准确度才等于仪表的准确度; 而当被测量越是小于满刻度值时, 测量结果的相对误差越是增大并有增至无穷的趋势。因此, 不能把仪表的准确度和仪表指示值的准确度两者混为一谈。选用仪表时, 不能单纯追求仪表的高准确度, 还必须兼顾仪表的量限, 通常应使仪表的指示值大于量限的一半。同理, 使用高准确度的指示仪表去检定低准确度的指示仪表时, 两种仪表的量限应选得尽可能一致。

[练习与思考]

1-1-1 用量限为 10A 的电流表去测量一实际值为 8A 的电流, 读数为 8.1A。求测量的绝对误差和相对误差。若所求得的绝对误差就是最大绝对误差, 电流表在规定的正常工作条件下使用, 仪表内阻略去不计, 问该电流表的准确度应为哪一级?

1-1-2 用 0.5 级 300 V 量限的电压表和 1.0 级 75 V 量限的电压表在规定的正常工作条件下分别去测量 60V 的电压(电压表内阻认为是无穷大), 试比较它们测量结果可能出现的最大相对误差。从这里可以得到什么启示?

1-1-3 要测量 110 V 的电压, 要求测量结果的相对误差不大于 $\pm 1.0\%$, 问应选用 150 V 量限的哪一级电压表?

§1-2 电工测量及测量误差的粗略估计

一、电工测量

(一) 电工测量及其意义

电工测量是利用电工仪表, 通过实验的方法将被测的电量(电压、电流、功率等)或磁量(磁感应强度、磁通等)与作为单位的同类标准电量或磁量进行比较, 从而确定被测量大小的过程。

只有通过电工测量, 才能掌握电工设备的运行状况, 认识电磁规律。因此, 电工测量对生产、教学、科研, 都有十分重要的意义。

(二) 直接测量与间接测量

在实验中, 我们常用电压表去测电压, 用电桥去测电阻。这些测量, 其结果是从一次测量的实验数据中直接得到的, 属于直接测量。

工程上会用到伏安法测电阻, 即先测出电阻上的电压 U 和电流 I , 然后根据欧姆定律 $R=U/I$ 去确定电阻 R 。象伏安法测电阻这样, 先测量与被测物理量有一定函数关系的中间物理量, 然后利用测得的中间物理量的数值, 进行运算去确定被测物理量的数值, 这一类测量属于间接测量。

二、测量误差及其产生的原因

无论选用何种仪表, 也无论采用何种方法进行测量, 测量结果与被测物理量实际值之间总

存在着差异,这个差异称为测量误差。

测量误差主要由仪表误差和测量方法误差组成。此外,外界的偶然干扰、实验人员的疏忽大意也会造成误差。

测量方法误差是由于测量方法不完善、采用了近似公式等原因造成的。如图 1-1, 为了测量 $10\text{ k}\Omega$ 电阻上的电压 U_0 , 可用一只电压表与 $10\text{ k}\Omega$ 电阻并联。由于电压表内阻不可能为无穷大, 这时即使电压表本身无限准确, 其指示值 U' 也不是原先要测量的 U_0 了。很明显, 如果实验中忽略电压表内部的影响, 把 U' 近似看作 U_0 , 就会产生测量方法误差 γ_w 。

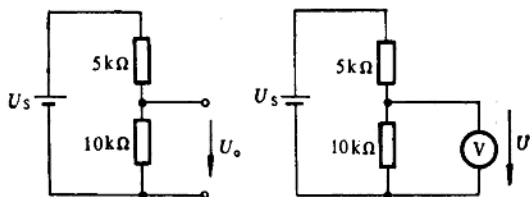


图 1-1

$$\gamma_w = \frac{U' - U_0}{U_0} \times 100\% = \frac{U_s \frac{10 R_v}{10 + R_v} - U_s \frac{10}{10 + 5}}{U_s \frac{10}{10 + 5}} \times 100\%$$

上式中, R_v 为电压表内阻并以 $\text{k}\Omega$ 为单位, 若 R_v 已知, 则可由它求出测量方法误差。

三、工程上测量误差的粗略估计

测量总有误差。因此在测量完毕时, 不仅要确定被测物理量的数值, 而且还要估计测量结果的准确程度。这里, 我们只简单讨论工程上测量误差的粗略估计。

(一) 直接测量时测量误差的粗略估计

此时, 测量误差主要由仪表误差和测量方法误差组成。

仪表误差包含基本误差和附加误差。仪表的基本误差用相对误差表示时的计算公式, 上一节已讨论过, 为

$$\gamma_{jm} = \frac{\pm K\% \cdot A_m}{A_s} \times 100\%$$

仪表偏离规定的正常工作条件进行测量, 其附加误差也用最大引用误差表示并可从 GB 776-76 查到。仪表的附加误差用相对误差表示时的计算完全相似于基本误差的计算。

至于测量方法误差要根据具体情况, 用电路理论估算, 或设法实测出来, 没有固定的计算模式。

例 1-2-1 在环境温度为 30°C , 其他条件均为规定的正常工作条件的情况下, 使用准确度 $K=1.5$ 、内阻为 $15\text{ M}\Omega$ 、量程 $U_m=75\text{ V}$ 的 A 组电压表测得图 1-1(a) 电路 $10\text{ k}\Omega$ 电阻上的电压, 读数为 $U_s=60\text{ V}$, 试估计测量结果的误差。

解: 该电压表若在规定的正常工作条件下使用, 仪表可能出现的最大基本误差

$$\gamma_m = \frac{\pm K\% \cdot U_m}{U_x} = \frac{\pm 1.5\% \times 75}{60} \approx \pm 2\%$$

查国家标准 GB 776-76 可知, A 组 1.5 级指示仪表规定正常的工作温度为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 温度每偏离 10°C , 所引起的附加误差用最大引用误差表示也是 $\pm 1.5\%$ 。显而易见, 现温度偏离不足 10°C , 最大引用误差 $\pm \alpha\% = \pm 1.5\%$, 温度偏离所引起的附加误差用相对误差表示为

$$\gamma_{tm} = \frac{\pm \alpha\% \cdot U_m}{U_x} = \frac{\pm 1.5\% \times 75}{60} \approx \pm 2\%$$

因此, 电压表测量时仪表误差的范围为 $\pm 4\%$ 。电压表的内阻远大于 $10\text{k}\Omega$ 电阻, 所以忽略电压表内阻影响的方法误差明显比仪表误差小, 可不加以考虑。被测电压的范围或测量结果可表示为

$$U_0 = 60(1 \pm 4\%) \text{ V}$$

(二) 间接测量时测量误差的粗略估计

间接测量必须先测量与被测物理量有一定函数关系的中间物理量, 这些中间物理量是通过各自的直接测量来确定的, 如前所述, 它们的测量结果必然会有误差。利用这些有误差的数据进行一定的运算去求出被测物理量, 其最终结果也肯定会有误差。下面介绍一些间接测量结果误差的粗略估计方法。

1. 被测物理量 y 为中间物理量 x_1, x_2 之和时

$$y = x_1 + x_2$$

绝对误差

$$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2$$

实际工作中常常由仪表的量限和准确度出发估计误差, 因而常常不能确定误差的正负号, 这时要考虑最坏的可能, 即各中间物理量误差同号产生 $\Delta y_{\max}$ 这一可能

$$|\Delta y_{\max}| = |\Delta x_1| + |\Delta x_2| \quad (1-6)$$

2. 被测物理量 y 为中间物理量 x_1, x_2 之差时

和前一种情形一样的思路去分析, 可得最不利情况下仍有

$$|\Delta y_{\max}| = |\Delta x_1| + |\Delta x_2|$$

例 1-2-2 如图 1-2 所示, 用 100mA 量限、 0.5 级的毫安表在正常工作条件下测得直流电流 I_1 读数为 85.0mA , I 的读数为 90.0mA , 试求由 $I_2 = I - I_1$ 间接测量 I_2 所得结果的误差多大? 毫安表内阻影响略去不计。

解: 所用毫安表在给定工作条件下测量电流可能产生的最大绝对误差

$$\Delta_m = \pm 0.5\% \times 100 = \pm 0.5\text{mA}$$

所以

$$I = 90.0 \pm 0.5\text{mA}$$

$$I_1 = 85.0 \pm 0.5\text{mA}$$

$$I_2 = I - I_1 = (5 \pm 1) = 5(1 \pm 20\%) \text{mA}$$

由本例可以看出, 大小相近的两个中间物理量相减的间接测量误差往往很大, 应另找恰当的方法去测量 I_2 (如使用合适的毫安表直接测量 I_2)。

3. 被测物理量 y 等于中间物理量 x_1, x_2 之积时

设 $x_1 = x_{10} + \Delta x_1$, $x_2 = x_{20} + \Delta x_2$, 其中 x_{10} 和 x_{20} 分别是中间物理量 x_1 和 x_2 的实际值, 则 y 间接测量结果的相对误差为

$$\begin{aligned}\gamma_y &= \frac{y - y_0}{y_0} \times 100\% = \frac{(x_{10} + \Delta x_1)(x_{20} + \Delta x_2) - x_{10}x_{20}}{x_{10}x_{20}} \times 100\% \\ &= \frac{x_{10} \cdot \Delta x_2 + x_{20} \cdot \Delta x_1 + \Delta x_1 \cdot \Delta x_2}{x_{10}x_{20}} = \gamma_{x_1} + \gamma_{x_2} + \gamma_{x_1} \cdot \gamma_{x_2}\end{aligned}$$

上式中, γ_{x_1} 和 γ_{x_2} 分别为 x_1 和 x_2 测量结果的相对误差, 一般情形下, γ_{x_1} 和 γ_{x_2} 都较小, $\gamma_{x_1} \cdot \gamma_{x_2}$ 就更小了, 故可略去, 有

$$\gamma_y = \gamma_{x_1} + \gamma_{x_2}$$

当不能确定 γ_{x_1} 和 γ_{x_2} 的正负号并从最不利的情形考虑时, 可能产生的最大相对误差

$$|\gamma_{y\max}| = |\gamma_{x_1}| + |\gamma_{x_2}| \quad (1-7)$$

4. 被测物理量 y 等于中间物理量 x_1, x_2 之商时

仿照积的情形的分析, 不难得到此时

$$\gamma_y = \gamma_{x_1} - \gamma_{x_2}$$

当不能确定 γ_{x_1} 和 γ_{x_2} 的正负号并从最不利情形考虑时, 仍有

$$|\gamma_{y\max}| = |\gamma_{x_1}| + |\gamma_{x_2}|$$

从前面的讨论可以看出, 粗略估计间接测量的误差时, 加减的情形宜用绝对误差形式进行, 乘除的情形宜用相对误差的形式进行。

例 1-2-3 用伏安法测电阻的一种原理电路如图 1-3 所示。在规定的正常工作条件下, 1 A 量限、0.5 级、内阻 R_A 为 0.1 Ω 的电流表读数为 0.500 A; 10 V 量限、0.5 级的电压表读数为 8.00 V。试估计被测电阻 R_x 测量结果的误差范围。

解: 电压表和电流表读数的相对误差分别为

$$\gamma_U = \frac{\pm 0.5\% \times 10}{8.00} \approx \pm 0.6\%$$

$$\gamma_I = \frac{\pm 0.5\% \times 1}{0.500} = \pm 1\%$$

电压表所测的值实际上是 $(R_x + R_A)$ 上的电压, 电流表所测的是 $(R_x + R_A)$ 上的电流, 如果记 $R'_x = R_x + R_A$, 则

$$R'_x = \frac{U}{I}$$

$$|\gamma_{R'_{x\max}}| = |\gamma_U| + |\gamma_I| = 0.6\% + 1\% = 1.6\%$$

$$R'_x = 16.0(1 \pm 1.6\%) \Omega$$

被测电阻

$$R_x = R'_x - R_A = [16.0(1 \pm 1.6\%) - 0.1]$$

$$= 15.9(1 \pm 1.6\%) \Omega$$

显然, 若忽略电流表的内阻影响, 把 R'_x 和被测电阻 R_x 等同看待, 所带来的测量方法误差为

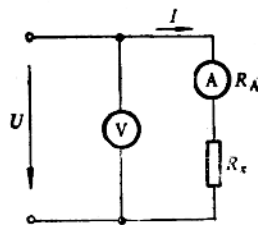


图 1-3

$$\gamma_{\pi} = \frac{0.1}{16} \approx 0.7\%$$

四、有效数字及其计算规则

在测量过程中,仪表的读数及间接测量结果的计算用几位数字来表示是很重要的。它涉及有效数字及其计算规则。

(一) 有效数字的正确表示

(1) 记录仪表的指示值时,只保留一位与仪表准确度相适应的欠准数字。

(2) 算式中的常数(如 π 、 e 、 $\sqrt{2}$ 、仪表量限等)的有效数字位数没有限制,计算时需要取几位就取几位。

(3) 大数数值与小数值要用幂的乘积形式来表示,例如用兆表测得功率为 4.50×10^6 W,不能记为 4500000 W。

(4) 误差一般只取一位有效数字,最多取两位有效数字。

(二) 有效数字的运算规则

间接测量结果的计算过程中,常常遇到精确度不等、有效数字位数不等的数值参与运算。按照一定的规则计算,既可以提高计算速度,也不会因为数字位数减少而影响计算结果的准确度。常可用以下规则:

1. 加减运算

在进行有效数字的加减运算之前,先将参加运算的各个数字的小数点后位数修约到比小数点后位数最少的数只多一位小数。加减运算后,计算结果应保留的小数位数与原来近似值中最少的小数位数相同。

例如,13.6、0.056 和 1.666 相加,小数点后位数最少的是 13.6,则应取

$$13.6 + 0.06 + 1.67 = 15.33 \approx 15.3。$$

2. 乘除运算

在进行有效数字的乘除运算之前,先将参加运算的各个数字修约到比有效数字位数最少的那个数多保留一位有效数字,最终计算结果的有效数字仍取与有效数字位数最少的那个数相同。

例如,13.6、0.056 和 1.666 相乘,有效数字位数最少的是 0.056,则经修约处理,取

$$13.6 \times 0.056 \times 1.67 = 1.271872 \approx 1.3。$$

用电子计算器运算时,也要遵循以上规则。

(三) 有效数字的修约规则

当有效数字位数确定之后,多余的位数应一律进行修约(舍入)处理,其规则为:

(1) 所要舍去的数字中最左面的第一个数字小于 5,则舍去;若大于 5,则进 1。例如, $\pi = 2.71828\cdots$ 取三位有效数字时为 2.72,取四位时则为 2.718。

(2) 所要舍去的数字中最左面的第一个数字等于 5,而 5 之后的数不全为 0,则进 1。例如把 6.4502 修约到小数点后一位,结果为 6.5。

(3) 所要舍去的数字中最左面的第一个数字等于 5,而 5 之后的数字全为 0,则当所保留

的数字的末位数为奇数时,末位数加1;否则末位数不变。例如,要把6.150和8.450修约得只留一位小数,前者结果为6.2,后者结果为8.4。这和一般的“四舍五入”规则不同,逢5就入会在大量的数字运算中造成累积误差,而根据所保留的末位数的奇偶来决定舍入,可以使舍与入的机会均等,提高最终计算结果的准确度。

[练习与思考]

1-2-1 根据国家标准规定, A 组 1.0 级指示仪表正常工作温度为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 每偏离 10°C , 由此引起的附加误差以最大引用误差表示也是 $\pm 1.0\%$ 。现利用 A 组 1.0 级、量程为 1A 的电流表在 30°C 环境温度、其他条件均符合规定的正常工作条件的情形下测量一电流, 读数为 0.80A, 电流表内阻的影响可忽略不计, 试估算本次测量结果的误差。

1-2-2 有人用 0.5 级 100V 量程的电压表在规定的正常工作条件下测出图 1-4 电路中的电压 $U=90.0\text{V}$, $U_1=89.3\text{V}$, 然后根据 $U_2=U-U_1$ 间接测量 U_2 , 其结果可靠吗? 试分析之。(电压表内阻影响忽略不计)

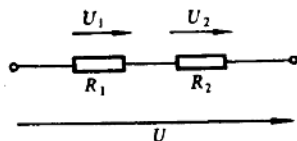


图 1-4

1-2-3 测得电阻上的电压 $U=10.0(1 \pm 1\%) \text{V}$, 电流 $I=0.80(1 \pm 2\%) \text{A}$,

求间接测量电阻功率的测量结果。

1-2-4 求出以下数字修约为四位数字的结果:

- (1) $\pi=3.14159\dots$;
- (2) $\sqrt{2}=1.414213\dots$;
- (3) 4.7155;
- (4) 7.3225。

§1-3 指示仪表的分类和表面标记

一、指示仪表的分类

- (1) 按仪表的工作原理, 可分为磁电系、电磁系、电动系、感应系等几种仪表。
- (2) 按被测量的名称, 可分为电流表、电压表、功率表、兆欧表、电度表等。
- (3) 按被测电流的种类, 可分为直流表、交流表、交直流两用表。
- (4) 按使用方式, 可分为便携式和开关板式。

此外, 按仪表准确度可分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 七级; 按仪表防御外来电磁场能力可分为 I、II、III、IV 四级; 按仪表使用的气温等环境条件可分为 A、B、C 三组。

二、指示仪表的表面标记

在每只指示仪表的表面(刻度盘)上, 都标有各种符号标记, 用来表示该仪表的工作原理、被测量单位、准确度等级、正常工作位置等主要技术特性, 以便正确选择和使用仪表。

表 1-2 给出了一些常用的指示仪表的表面标记。

三、指示仪表的主要技术要求

国家标准对电工仪表的质量提出全面的要求, 主要是:

- (1) 要有足够的准确度。

表 1-2

分类	符 号	名 称	分类	符 号	名 称
电流种类	—	直 流	外 界 条 件		I级防外磁场 (例如磁电系)
	~	交 流			I级防外电场 (例如静电系)
	— II —	直流和交流		 	II级防外磁场及电场
测 量 单 位	A	安		 	III级防外磁场及电场
	V	伏		 	IV级防外磁场及电场
	W	瓦			A组仪表
	Var	乏			B组仪表
	Hz	赫			C组仪表
工 作 原 理		磁电系仪表	绝 缘 强 度		不进行绝缘强度试验
		电磁系仪表			绝缘强度试验电压为 2kV
		电动系仪表		+	正 端 钮
		磁电系比率表		-	负 端 钮
		铁磁电动系		*	公共端钮
准 确 度 等 级	1.5	以表尺量程的百分数表示	端 钮 调 零 器		与屏蔽相连接的端钮
		以指示值的百分数表示			调 零 器
工 作 位 置		标尺位置垂直			
		标尺位置水平			
		标尺位置与水平面夹 60°			

(2) 变差要小。所谓变差,是指仪表在重复测量某一被测量时,由于摩擦等因素的不均匀造成两次指示值的不同,它们的差值称为变差。对于指示仪表,重复测量被测量 A_0 , 当由零向上限值逐渐增加时,指示值为 A'_s ; 而由上限向零逐渐减小时,指示值为 A''_s , 则要求变差 $\Delta_s = A'_s - A''_s$ 不超过基本误差。

(3) 受外界温度、外磁场等因素影响引起的附加误差符合有关规定。

(4) 仪表本身功率消耗小。仪表在测量时,本身也必然要消耗一定的功率。为了减小接入仪表对电路原来工作状况的影响,要求仪表本身功率消耗要小。

(5) 刻度尽可能均匀,便于读数。