



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
五年制高等职业教育电类专业教学用书

电工测试技术

苏利捷 主编



中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

电工测试技术

苏利捷 主 编

邵 玫 周晓敏 副主编

李春茂 舒智慧 主 审

中 国 铁 道 出 版 社

2 0 0 7 年 · 北 京

内 容 简 介

本教材是教育部职业教育与成人教育司推荐教材。教材中体现“新知识、新技术、新工艺、新方法”,突出技能训练内容,充分体现职业教育特色。

本教材内容包括绪论和电工测试技术的基本知识,直流电流、电压和电阻的测量,单相正弦交流电路电压、电流的测量,单相正弦交流电路功率、电能和电路参数的测量,三相正弦交流电路电流、电压、功率和电能的测量,非正弦周期性电流电路的测量,一阶电路、二阶电路和二端口网络的测量,磁测量、电路仿真的研究共8章内容。附录内容是供学生组装万用表综合实习时用。

本教材可作为高职、高专电类学生电工测试技术课教材。

图书在版编目(CIP)数据

电工测试技术/苏利捷主编. —北京:中国铁道出版社,
2007.2

ISBN 978-7-113-07689-4

I. 电… II. 苏… III. 电气测量-成人教育:高等
教育-教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 007318 号

书 名:电工测试技术

作 者:苏利捷 主编

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:阚济存

封面设计:冯龙杉

印 刷:河北省遵化市胶印厂

开 本:787×1092 1/16 印张:9.25 字数:224 千

版 本:2007年2月第1版 2007年2月第1次印刷

印 数:1~3 000 册

书 号:ISBN 978-7-113-07689-4/TP·2186

定 价:12.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话 010-51873133

发行部电话 010-51873124



前言



本书由全国铁路高职和中专供电专业教学指导委员会组织编写,是教育部职业教育与成人教育司推荐教材。本书结合高职、高专教育特点,以理论与实践相结合、突出培养学生的技术应用能力为目的,在内容结构、阐述方法和文字表达上,顾及学生知识水平,力求循序渐进、通俗易懂,是高职、高专电工测试技术课的教学用书。

全书分为8章,绪论讲述了开设电工测试技术课的意义和学习方法;第一章介绍基本测量知识和误差理论;第二章介绍磁电系仪表工作原理和直流电路测试技术,并安排了一个旨在提高学生综合实验能力的实验;第三章介绍整流系、电磁系、电动系仪表的工作原理和单相正弦交流电路测试技术及一个综合实验;第四章介绍电动系功率表、感应系电度表工作原理和单相电路功率、电能、电路参数测试技术;第五章介绍三相电路测试技术;第六章介绍非正弦周期电路、一、二阶电路和二端口网络电路测试技术;第七章介绍磁测量仪器工作原理和磁测量技术;第八章简单介绍了EWB电路仿真软件在电工测试技术中的应用;在附录部分安排一个“万用表的组装与调试”的电工测试技术实训课程。书中带“*”部分为选学内容,部分实验提供的仪器设备仅供参考。

本书由苏利捷主编,邵玫、周晓敏副主编。其中苏利捷编写绪论和第一、二、七、八章;邵玫编写第四、五章及第六章第二~第四节;周晓敏编写第三章、第六章第一节;全书由苏利捷统稿。

本书由教育部推荐专家西南交通大学李春茂和内江铁路机械学校舒智慧主审。北京铁路电气化学校李伟老师,内江铁路机械学校李鲁华、陈凤玲老师,武汉铁路运输学校李福民老师对该书提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥和遗漏之处,恳请各位老师和读者批评指正,提出宝贵意见。

编者
2006.9

目 录

绪 论	1
-----	---

第一章 电工测试技术的基本知识

第一节 测量误差的基本概念	5
第二节 有效数字和测量数据的处理	10
第三节 测量方法简述及常用电气仪表常识	12

第二章 直流电流、电压和电阻的测量

第一节 磁电系仪表	15
第二节 直流电路的认识实验(实验 1)	19
第三节 电阻和电源伏安特性的测定(实验 2)	21
第四节 实际电源两种电源模型的研究(实验 3)	26
第五节 直流电阻的测量	29
第六节 欧姆表、直流单臂电桥和双臂电桥测电阻(实验 4)	38
第七节 伏安法测电阻(实验 5)	40
第八节 电路中各点的电位的测量(实验 6)	42
第九节 验证基尔霍夫定律和叠加定理(实验 7)	44
第十节 验证戴维南定理(实验 8)	46
第十一节 直流电路综合实验(自行设计实验)	49

第三章 单相正弦交流电路电压、电流的测量

第一节 整流系电流表、电压表及万用表	51
第二节 万用表的使用(实验 9)	56
第三节 电磁系仪表	58
第四节 测量用互感器	61
第五节 常用电子测量仪器简介	66
第六节 常用电子测量仪器的使用(实验 10)	77
第七节 用示波器观测 RL、RC 串联电路的相位差(实验 11)	80
第八节 RLC 串联电路及电压谐振(实验 12)	83

第九节	RLC 并联电路及电流谐振(实验 13)	85
第十节	互感器同名端和互感系数 M 的测定(实验 14)	88
第十一节	电动系电流表和电压表	89
第十二节	交流电路综合实验(自行设计实验)	91

第四章 单相正弦交流电路功率、电能和电路参数的测量

第一节	电动系功率表	93
第二节	单相感应系电度表	96
第三节	日光灯电路及功率因数的提高(实验 15)	99
第四节	单相交流电路电能的测量(实验 16)	101
第五节	交流线圈参数的测定(实验 17)	103

第五章 三相正弦交流电路电流、电压、功率和电能的测量

第一节	星形三相交流电路(实验 18)	105
第二节	三角形三相交流电路(实验 19)	106
第三节	三相功率的测量	108
第四节	三相电路功率的测定(实验 20)	109
第五节	三相感应系电度表和三相电能的测量(实验 21)	110

第六章 非正弦周期性电流电路及一阶电路、

二阶电路和二端口网络的测量

第一节	非正弦周期性电流电路的测量(实验 22)	113
第二节	RC 一阶电路响应的研究(实验 23)	115
第三节	RLC 二阶电路响应的研究(实验 24)	117
第四节	线性无源二端口网络参数的测定(实验 25)	119

第七章 磁 测 量

第一节	磁测量仪器简介	123
第二节	磁场的测量(实验 26)	125
第三节	磁滞回线的测定(实验 27)	128

第八章 电路仿真的研究

附录 组装万用表综合实习

参考文献	140
------	-----

绪 论

电工测试技术是一门以电工理论和实验为基础的技术基础课,是一门实践性很强的课程,侧重于理论指导下的实践、技能培训及综合能力的提高,目的是将所学理论知识转化到实际应用,为后续实验课、专业课的学习及今后的工作打下一个良好的基础。

一、电工测试技术课开设的目的

通过本课的学习要达到以下目的:

1. 了解实验室基本常识。
2. 掌握电工仪表、仪器的正确使用。
3. 掌握常见电工、电子器件的识别与应用。
4. 掌握基本电工测量方法。
5. 掌握实验结果的分析与数据处理。
6. 掌握实验报告的撰写。
7. 掌握严谨的科学实验态度及良好的操作习惯。
8. 培养善于发现问题、分析问题、解决实际问题的能力。

二、电工测试技术课学习方法及能力培养

学习本课程的主要方法是实验,为了使实验课达到预期效果,要做到课前认真预习,课上认真做实验,课后认真完成实验报告等三个环节,每个环节都有其明确的任务和目的。

(一) 预习

预习时要仔细阅读实验指导书,复习有关电工基础、电工测量和电工仪表的理论知识,明确试验目的和要求,了解实验原理、线路、方法和步骤,对观察哪些实验现象、记录哪些数据和注意事项做到心中有数。

(二) 实施实验

实施实验的任务是将预定方案付诸实验的过程,在此过程中主要有以下几个环节:

1. 准备工作。
2. 连接实验线路。
3. 检查实验线路。
4. 接通实验电源。
5. 操作、观察和记录。
6. 拆线、整理工作。

(三) 编写实验报告

实验结束后,必须认真及时地写出实验报告。实验报告是实验结果的总结和反映。学习

本课程后要求培养的能力:

1. 能够正确熟练使用电流表,电压表,万用表,单、双臂电桥,电阻箱,可变电阻器,单相变压器和直流稳压电源,并了解其结构、原理和主要技术特性。
2. 熟练掌握电路中电流电压和功率等电量和磁通、磁场强度等磁量的测量方法。
3. 学会使用信号发生器、晶体管(或电子管)电压表、示波器等常用电子仪器。
4. 能够根据实验需要,正确选择电路元件,按电路图正确接线,分析并排除线路中的简单故障。
5. 了解电路实验中误差产生的原因,减小和消除误差的方法。学会正确处理数据、绘制图线,分析实验结果,并能写出实验报告。
6. 验证、巩固、并加深理解电工基础课程中的基本概念和基本定律。
7. 培养实验操作的规范化,懂得安全用电的一般常识。同时也培养理论联系实际、实事求是、严肃认真的工作作风和科学态度,发扬团结协作和爱护仪器仪表的良好风尚。

三、编写实验报告的要求及主要内容

实验后要写出实验报告,这是一项很有价值的工作,实验报告是实验结果的总结和反映。一个实验的价值,很大程度上取决于实验报告质量的高低。

(一)编写实验报告的要求

1. 实事求是的科学态度,实验结果要真实地反映到实验报告中,不允许更改或主观臆断,因操作错误使数据违背规律,应重做实验,重新取得数据。
2. 符合要求的具体内容,实验报告应以实验目的和实验要求为具体内容。
3. 报告形式应规范,文字流畅,语言准确,书写清楚,整齐,数据完整,图表规范,分析合理,结论有据。
4. 报告不应是空洞、宏观的总结,或是一些电路图、数据表格、图形、曲线等材料的罗列。

(二)实验报告的主要内容

1. 实验日期、班级、组别、本人及同组实验者的姓名和学号。
2. 实验名称。
3. 实验目的。
4. 实验原理(包括实验电路)。
5. 实验仪器仪表的名称、型号、主要规格和编号。
6. 实验内容。
7. 整理后的实验结果及对实验结果的分析结论。
8. 实验后的体会、经验与教训及对实验的建议。

四、实验室的供电系统和安全用电

(一)实验室的供电系统

实验室通常使用的动力电是频率为 50 Hz、线电压 380 V、相电压 220 V 的三相交流电,采用 Y-Y 连接。从配电室到实验室线路图,如图 0-1 所示。

U、V、W 为三条火线,O 为回流线。回流线通常在配电室一端接地,因此又称地线(零

线),其对地电位为 0。该供电系统称为三相四线制供电系统。实验室的仪器通常采用 220 V 供电,并经常是多台仪器一起使用。为了保证操作人员的人身安全,需要将多台仪器的金属外壳连在一起并与大地连接,因此在用电端的实验室需要引入一条与大地连接良好的保护地线。从实验室配电盘(电源总开关)到实验台的供电线路如图 0-2 所示。

220 V 的交流电从配电盘分别引到各个实验台的电源接线盒上,电源接线盒上有两芯插座和三芯插座供用电器使用。按照电工操作规程要求,两芯插座与动力电的连接是左孔接零线,右孔接火线,即左“零”右“火”。三芯插座除了按左“零”右“火”连接之外,中间孔接的是保护地线(GND)。因此,实验室的供电系统比较确切的叫法应该是三相四线一地制,即三条火线、一条零线、一条保护地线。

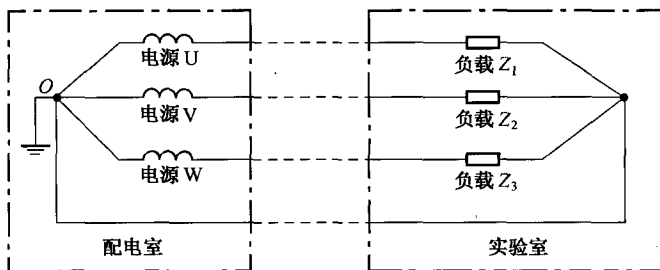


图 0-1 实验室供电系统

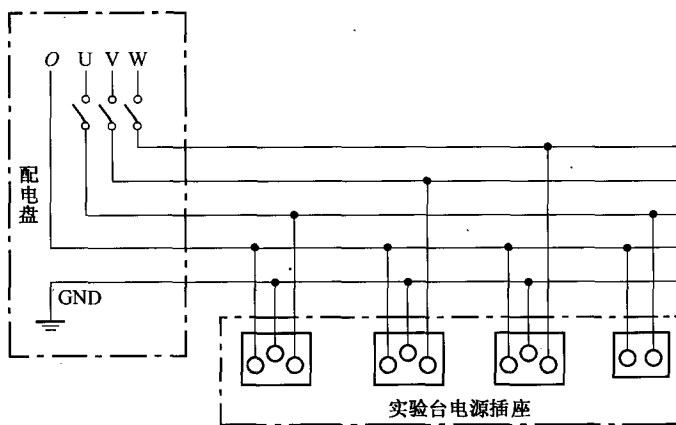


图 0-2 实验台供电线路

(二) 实验室的安全用电

安全用电指两个方面：一是人身安全，二是仪器安全。

1. 人身安全

由于实验室采用 220 V/50 Hz 的交流电,当人体直接与动力电的火线接触时就会遭到电击。一般安全电压为 36 V,超出该电压时就有可能对人体造成伤害。如何识别零线和火线呢?最简便的方法是用试电笔。试电笔是由金属探头、氖管、大电阻(大于 1 MΩ)、金属尾组成。使用时只要手指与金属尾接触,金属探头放到电源插孔里即可,这样,电源从金属探头、氖管、大电阻、金属尾及人体到大地构成回路。若是火线,氖管就会发光;若是零线,

氖管就不发光。使用时,一定要注意手指不能与试电笔的金属探头接触。为了防止触电,对使用动力电的仪器设备、用电器要经常检查电源插头有无松动,导线是否破损,外壳接地是否良好等。

2. 仪器安全

每台仪器只有在额定的电压下才能正常工作。当电压过高或过低时都会影响仪器正常工作,甚至烧坏仪器。我国生产并在国内销售的电子仪器多采用 220 V/50 Hz 交流电,在一些进口或国内外销售的国产电子仪器中,有一个 220/110 V 电源选择开关,用电前一定要将此开关置于与供电电网电压相符的位置。另外,还要注意仪器用电的性质,是交流还是直流,不能用错。若用直流供电,除电压幅度满足要求外,还要注意电源的正、负极性。

第一章

电工测试技术的基本知识

在电工实验中,离不开电工测量,因此首先必须了解电工测量的基本知识,包括电工测量的测量方法,电工仪表的准确度等级,测量误差和测量准确度的评定,消除测量误差的方法,电工仪表的分类、标记和型号,对电工仪表的一般要求等。以便在实验中正确地选择和使用仪表,运用正确的测量方法,获得最佳的实验效果。

第一节 测量误差的基本概念

一、测量误差分类和表示方法

(一)测量误差的分类

不论采取何种测量方式,也不论是用何种仪器仪表,由于仪表本身不可能绝对准确,加上测量方法、实验者本人经验以及人感官的条件限制等方面的原因,都会使测量产生误差,测量误差可以分成三种类型。

1. 系统误差

系统误差是指在相同条件下,多次测量同一个量时,误差大小和符号均保持恒定或按某种规律变化(例如有规律地逐渐增大或周期性增大和减小)的一种误差。系统误差总是由某个特定的原因引起的,而且这种原因总是持续存在而不是偶发的,按其产生的原因又可分为如下两种。

(1)基本误差

基本误差是指仪表在规定的工作条件下,即在规定的温度、湿度、放置方式、外界电场和磁场干扰等条件下,由于仪表本身结构不完善而产生的一种固有误差,例如转动部分的摩擦、刻度不准、轴承与轴尖的间隙所造成可动部分的倾斜等等。

(2)附加误差

附加误差是指仪表使用时偏离规定的工作条件而造成的误差,例如温度过高、波形非正弦、外界有电磁场干扰等。

2. 偶然误差

偶然误差又称为随机误差,它是由偶发原因出现的一种大小、方向都不确定的误差。这种误差没有什么规律也难以预计,但从其总体来讲却服从统计规律。例如由于环境因素的突然变化、测量人员感官的某种缺憾所造成的误差。

3. 疏忽误差

这是一种由测量人员的粗心疏忽造成的严重歪曲测量结果的误差,例如读数错误、记录错误等。

(二) 测量误差的表示方法

测量误差的表示方法有三种。

1. 绝对误差

用测量值 A_x 与被测量真值 A_0 之间的差值所表示的误差称为绝对误差,即

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

绝对误差的单位与被测量的单位相同,误差符号可能为正,也可能为负。

一般情况要确切的定出被测量的真值是很困难的,因此在一般的测量中,通常用高一级以上的标准仪器测得的值代替真值。

绝对误差可以说明测量值偏离实际值的程度,但不能很好反映出测量值的准确程度。例如:测量两个电压,其中一个是 $U_1 = 50 \text{ V}$,其测量绝对误差 $\Delta U_1 = \pm 1 \text{ V}$,与实际相比,误差达 2%,显然误差太大不能允许,另一个 $U_2 = 10\,000 \text{ V}$,测量绝对误差为 $\Delta U_2 = \pm 10 \text{ V}$,与实际相比达 0.1%,由此可见尽管 ΔU_1 小于 ΔU_2 ,却不能得出对 U_1 测量比 U_2 的测量准确度高的结论。

2. 相对误差

绝对误差 Δ 与被测量真值 A_0 之比称为相对误差,即

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

由于一般情况下被测量的测量值与真值相差不大,故相对误差表示

$$\gamma \approx \frac{\Delta}{A_x} \times 100\%$$

【例 1-1】 用一电压表测量 100 V 电压时,其绝对误差为 +1 V;用另一电压表测量另一电压读数为 10 V 时,绝对误差为 +0.5 V。求它们的相对误差。

【解】

$$\gamma_1 = \frac{\Delta_1}{A_{x1}} \times 100\% = \frac{1}{100} \times 100\% = +1.0\%$$

$$\gamma_2 = \frac{\Delta_2}{A_{x2}} \times 100\% = \frac{0.5}{10} \times 100\% = +5.0\%$$

可见前者的绝对误差大于后者,但误差对测量结果的影响,后者却大于前者。前者测量结果的精确程度比后者高。在工程上凡是要求计算测量结果的误差时,一般都用相对误差表示。相对误差是一个没有单位的数。

3. 引用误差

绝对误差 Δ 与仪表上量限 A_m 的比值所表示的误差称为引用误差,用 γ_n 表示为

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

由于仪表在不同刻度点的绝对误差略有不同,因此取可能出现的最大绝对误差 Δ_m 与仪表上量限(即满度值) A_m 之比称为最大引用误差,即

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

一般测量时的绝对误差在仪表标尺的全长范围内基本保持不变,而相对误差却随着被测量的减小而逐渐增大,而且有可能增至无限大,所以相对误差可以用来说明测量结果的准确程度,却不能说明仪表本身的优劣。最大引用误差的公式(1-4)中的分子分母都由仪表本身性能所决定,所以最大引用误差可以用来评价仪表性能。实用中就用它表征仪表准确度等级。

二、仪表的准确度等级

国家标准(《电测量指示仪表通用技术条件》,代号为 GB/T 7676.1—1998)规定,仪表的准确度 K 用最大引用误差来表示,即仪表在规定的工作条件下使用,仪表准确度 K 的百分数应大于或等于最大引用误差的绝对值,其关系式为

$$K \geq \left| \frac{\Delta_m}{A_m} \right| \times 100\% \quad (1-5)$$

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,K 应选表 1-1 中最小的一个。

表 1-1

仪表准确度等级	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 因不能确定正负,其范围表示为

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

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

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_x} \times 100\% = \frac{\pm K \cdot A_m}{A_x} \times 100\% \quad (1-6)$$

应该指出,当利用式(1-4)、(1-5)、(1-6)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。

【例 1-2】 分别用量限为 100 mA、准确度为 0.5 的直流毫安表和量限为 10 mA、准确度为 2.5 的直流毫安表在规定的正常工作条件下去测量实际值为 9 mA 的直流电流,求两次测量可能产生的最大绝对误差和相对误差(仪表内阻的影响略去不计)。

【解】 第一只毫安表测量时

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

$$\gamma_{m1} = (\pm 0.5\% / 9) \times 100\% \approx \pm 6\%$$

第二只毫安表测量时

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

$$\gamma_{m2} = (\pm 0.25 / 9) \times 100\% \approx \pm 3\%$$

从式(1-6)和例 1-2 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程度。后者还与被测量的大小有关,只有当仪表应用于满刻度时,指示值的准确程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大的趋势。因此,不能把仪表的准确度和仪表指示值的准确程度两者混为一谈。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。

三、误差的消除方法

1. 系统误差的消除方法

对于系统误差,不论是基本误差还是附加误差。最佳的消除方法就是改进仪表的制造工艺,选择质量优良的元器件,加强各种屏蔽措施,防止外界环境对仪表的影响。但从根本上说,要做到无误差是不可能的,只能用某些补偿办法消除可能出现的误差。常用的补偿方法有如下几种。

(1)用比较法消除系统误差。比较法是将被测量与度量器置于比较仪器上进行比较,从而求得被测数据的一种方法,比较法又分为零值法、差值法和替代法三类,差值法和零值法可以用来消除或减少指示仪表造成的系统误差,替代法不仅可以消除指示仪表的系统误差,而且可以消除比较仪器造成的系统误差。

(2)用正负误差补偿法消除系统误差。这种方法是对同一被测量,反复测量两次,并想法使其其中的一次误差为正,另一次为负,然后取其平均值,便可消除系统误差。

(3)利用校正值得被测量的真值。在精密测量中,常常使用校正的办法。校正值是被测量真值 A_0 与仪表实际读数 A_x 之差,用 δ_r 表示其计算公式为

$$\delta_r = A_0 - A_x \quad (1-7)$$

可见校正值在数值上等于绝对误差,但符号相反。如果在测量之前能预先对所用仪表的各个刻度求出校正值,或者制成校正曲线或校正表,那么测量时就可以从仪表读数和对应的校正值求得被测量的真值,即

$$A_0 = A_x + \delta_r \quad (1-8)$$

2. 偶然误差的消除方法

偶然误差一般都比较小,只有在精密测量中,当系统误差已经采取各种措施加以消除之后,偶然误差才不能忽略。

偶然误差就其个体而言,没有什么规律。但多次测量出现的偶然误差却有有界性、单峰性、对称性三个特征。

根据偶然误差这些特点,精密测量时可以通过多次的反复测量,求出其算术平均值,并用它作为被测量的真值,从而消除单次测量可能存在的偶然误差,即

$$A_0 = \bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad (1-9)$$

式中 $\bar{A}$ ——算术平均值;

n ——测量次数。

3. 疏忽误差的剔除方法

疏忽误差是人为原因造成的,在发现后加以剔除。

四、工程上测量误差的粗略估计

由于偶然误差一般都比较小,所以只有进行精密测量或精密实验中才予以考虑,而在一般工程测量时往往略而不计,只考虑测量中的系统误差。

(一) 直接测量时误差的粗略估计

用指示仪表进行直接测量,可以根据仪表的准确度等级,估计可能产生的最大误差。指示仪表的准确度等级用最大引用误差表示,有

$$K = \gamma_m = \frac{|\Delta_m|}{A_m} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中 K ——仪表准确度等级;

γ_m ——最大引用误差;

Δ_m ——最大绝对误差;

A_m ——仪表的上量限。

直接测量时可能出现的最大绝对误差和相对误差分别为

$$\Delta_m = \pm K A_m \quad (1-11)$$

$$\gamma = \frac{\pm K A_m}{A_x} \times 100\% \quad (1-12)$$

可见测量结果的准确度并不等于仪表准确度等级,测量结果可能出现的相对误差既与仪表准确度等级有关,也与仪表上量限 A_m 及实际被测量 A_x 有关。被测值越接近满度,其相对误差越小。

如果测量时不能满足规定的工作条件,那么系统误差应包括以准确度等级 K 所表示的基本误差,再加上工作条件变化时的附加误差。

(二) 间接测量时误差的粗略估计

1. 被测量 y 为中间量 x_1 和 x_2 之和

即

$$y = x_1 + x_2 \quad (1-13)$$

若测量 x_1 、 x_2 时的绝对误差为 Δx_1 、 Δx_2 ,被测量 y 将产生的绝对误差为 Δy ,则

$$y + \Delta y = (x_1 + \Delta x_1) + (x_2 + \Delta x_2) \quad (1-14)$$

将式(1-14)和式(1-13)相减得

$$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2 \quad (1-15)$$

实际测量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。

$$|\Delta y_{\max}| = |\Delta x_1| + |\Delta x_2| \quad (1-16)$$

2. 被测量 y 为中间量 x_1 和 x_2 之差

即

$$y = x_1 - x_2 \quad (1-17)$$

若测量 x_1 、 x_2 的绝对误差为 Δx_1 、 Δx_2 。被测量 y 所对应的绝对误差为 Δy , 则

$$y + \Delta y = (x_1 + \Delta x_1) - (x_2 + \Delta x_2) \quad (1-18)$$

考虑最不利情况是 Δx_1 、 Δx_2 取相同符号, 这时仍为 $|\Delta y_{\max}| = |\Delta x_1| + |\Delta x_2|$ 。

3. 被测量 y 为中间量 x_1 和 x_2 之积或商

$$y = x_1^n x_2^m \quad (1-19)$$

式中 x_1 、 x_2 ——直接测出的已知量;

n 、 m —— x_1 、 x_2 的指数, 可能为整数或分数、正数或负数, 若为正数则求积, 负数则求商。

对上式两边取自然对数得

$$\ln y = n \ln x_1 + m \ln x_2 \quad (1-20)$$

两边微分得

$$\frac{dy}{y} = n \frac{dx_1}{x_1} + m \frac{dx_2}{x_2} \quad (1-21)$$

式中 $\frac{dy}{y}$ 、 $\frac{dx_1}{x_1}$ 、 $\frac{dx_2}{x_2}$ 分别为被测量 y 和 x_1 、 x_2 的相对误差, 在最不利情况下, 均取正数

$$\gamma_y = |n\gamma_1| + |m\gamma_2| \quad (1-22)$$

第二节 有效数字和测量数据的处理

一、有效数字及其计算规则

在测量过程中, 仪表的指示值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) 有效数字的概念

由于测量不可避免有误差, 仪表的分辨能力有一定的限制, 所以, 测量数据不可能完全准确而往往是一个近似数。当我们用这种近似数表示被测量的量值时, 通常规定其末位数与绝对误差的大小相适应, 为不准确的数字, 即末位数是欠准数字。末位的欠准数字和它前面的精确数字一起, 组成有效数字。有效数字表示着近似值的准确度, 有效数字的位数称为有效位数。有效位数越多误差越小。

作为测量数据, 2.2 和 2.20 是有区别的。2.2 表示误差出现在小数点后第一位, 2.20 表示误差出现在小数点后第二位, 尽管其数值相等, 但 2.20 要比 2.2 精确。

为了保证测量仪器的准确度, 其机构必须能读出有足够测量数据的位数, 位数不够会增加仪器的测量误差。

(二) 有效数字的修约规则

通常, 对测量或计算所得数据要进行舍入处理, 以使它具有所需的位数, 这个处理过程叫修约。修约规则如下。

若选定有效位数为 n , 则第 $n+1$ 位后的多余数字按下列规则舍入:

1. 当 $n+1$ 位数大于 5 时, 则进 1。
2. 当 $n+1$ 位数小于 5 时, 则舍去。

3. 当 $n+1$ 位数字恰好等于 5 时, 应使用“偶数原则”: 若第 n 位为奇数, 则进 1; 若第 n 位为偶数, 则舍去。总之, 要使末位凑成偶数。这与“四舍五入”的一般规则不同, 根据末位的奇偶数决定入或舍, 可使入与舍的机会相等, 提高数据的准确度。

(三) 有效数字的运算规则

1. 加减运算

(1) 小数位数相等时, 其和、差的有效数字的小数位与原来相同。

(2) 小数位数不同时, 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。

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。

二、测量数据的处理

对实验(测量)数据的处理通常采用两种方式: 列表法和曲线法。

(一) 列表法

列表法就是将测取的原始数据进行整理分类后放在一个特制的表格里, 其目的是为了将所有数据有序地放在一起, 既可使实验结果一目了然, 也为对其进行分析提供方便。

用列表法能否达到上述目的, 制表是关键, 因此制表时要注意以下问题。

1. 项目齐全;
2. 项目名称简练易懂;
3. 测试条件明确;
4. 制表规范、合理、易读懂, 表达的信息完整。

(二) 曲线法

1. 特性曲线

用列表法可以把所有的试验数据有序地集中在一起, 以便进行观察和分析。但在研究器件、电路的特性时(如伏安特性、频率特性), 仅有数据表格还不能准确地反映出电路的变化规律。原因是: 一般电路的变化规律是连续的, 而表格数据是有限的、简短的。因此, 这就需把表格中的数据作为点的坐标放在坐标系中, 然后用线段把这些点连接起来, 形成一条曲线。用特性曲线描述实验结果, 具有直观完整、可获取更多的信息的优点, 但在绘制时要注意以下几点。

(1) 建立单位长度合适的坐标系, 项目齐全。

(2) 测量时要将所有的特殊点取到, 此外应按照曲线曲率小的地方少取、曲率大的地方多取的原则, 取足够的点。

(3) 绘制曲线时, 可剔除坏点(坏点可以标在图上, 但曲线不用通过该点, 只供分析使用)。坏点是指因操作或其他原因引起的测量结果与理论不符、脱离正常规律的点。

(4) 曲线要光滑, 粗细一致。

2. 响应曲线

在实验室进行实验, 对电路进行测量可看成是用仪器对电路进行求解。测量结果有的只