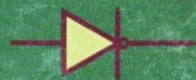


中等职业技术学校试用教材

广东、北京、广西中等职业技术学校教材编写委员会组编



电工仪表与测量



广东高等教育出版社

中等职业技术学校试用教材

电工仪表与测量

广东、北京、广西中等职业
技术学校教材编写委员会
组 编

广东高等教育出版社

·广州·

图书在版编目 (CIP) 数据

电工仪表与测量/广东、北京、广西中等职业技术学校教材

编写委员会组编. —广州: 广东高等教育出版社, 2001. 8

中等职业技术学校试用教材

ISBN 7-5361-2604-2

I. 电…

II. 广…

III. 电工仪表—电工测量—技术学校—教材

IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 057335 号

广东高等教育出版社出版发行

地址: 广州市广州大道北广州体育学院 20 栋

邮政编码: 510075 电话: 83792953 87552830

各地新华书店经销

广东省教育厅教育印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 12.25 字数: 283 千

2001 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 2 次印刷

印数: 1601—3800 册

定价: 18.00 元

前 言

以电子化、数字化、网络化、信息化为特征的知识经济已初见端倪，以信息技术为先导的科技进步日新月异。有资料表明：20世纪80年代初期，一项技术的寿命大约为30年；90年代，技术寿命变为10~15年；预计到了2005年，一项技术仅1~3年就将走下历史舞台。知识经济呼唤现代技术，呼唤大批德才兼备，具有专业技能、创新意识、创业能力，能参与市场竞争的现代人才，这给为经济和社会发展提供智力和人才保障的教育工作带来了机遇和挑战。当我们站在更高的起点和层面上审视我们过去的职业教育的时候，我们会发现，以3年的教育周期，至多仅能使受教育者掌握1~2项甚至仅仅1项专业技术（有的还只是初级水平的专业技术）的传统中等职业教育，远远不能适应知识经济发展的要求。观念、制度、教学内容、教学方法、教学手段等方面的改革已迫在眉睫。

当知识经济不断敲打21世纪大门的时候，广东、北京、广西三省市区的职教同行，决定以课堂教学内容的改革为核心，从课程改革和教材建设入手，编写一套依托三省市区骨干行业、支柱产业，糅合当今世界最新科技成果，体系完善、内容先进的中等职业技术学校的教材，以现代的课程体系和教材，推动职业教育教学内容、教学方法、教学手段的改革，以专业建设的现代化，推动职业教育的现代化。在20世纪的最后一年，这套教材终于面世了。

本套教材遵循“宽基础，重技能，活模块”和“一纲多本”的原则，在组织有关专家、学者审定教学大纲、教学计划的基础上，由三省市区近200名专家、学者、教授及职教第一线的资深教师编写，各专业课教材并经专家和同行业的有丰富实践经

验的人员审定，具有系统性和权威性。本套教材还保持了传统教育的基础性的特色，又注意吸纳当今世界最新科技成果，结合三省市区骨干行业、支柱产业的实际，因此具有实用性、科学性和先进性。

对于本套教材中存在的疏漏和不妥之处，敬请广大专家和读者批评指正，以便我们进一步修订和完善。

广东、北京、广西中等职业技术学校教材
编写委员会
1999年4月

编 者 说 明

《电工仪表与测量》是根据广东、北京、广西三省市区中等职业技术学校教材编写委员会确定的教学计划和教学大纲编写的。内容包括仪表测量的基本知识，电工仪表测量原理，电流、电压和电功率的测量，万用表的使用和测量，电阻的测量与常用仪器，电度表的使用与测量，常用电子仪器与测量和其它常用电工仪表。

为使理论更好地与实际相结合，突出技能训练，优化教学过程，在学完一章理论知识后安排了一定的技能训练内容。技能训练的内容与生产实际、与当地的职业技能鉴定相结合，对增强学生的岗位适应能力和实际操作水平，有重要的意义。

每章都附有一定数量的思考题，它对于理解仪表的原理、电气参数的测量方法和测量原理有很好的帮助。

本书第一、三、四章由王莉编写，第二、五、六、七、八章由林向淮编写，技能训练由安志强、杨少光编写。陈凯对第八章，邓琪瑜对第四、五章进行了修改，杨少光统稿并对其余章节作了修改和调整。叶孔伟负责全书的审稿。

电工专业系列教材由杨少光任主编、吴德俊、杜从商、韩亚兰任副主编。

对本书中的错误和不妥之处，恳请老师和读者提出批评和修改意见。

电工专业教材编写组

2001年4月

目 录

第一章 电气测量的基本知识.....	(1)
第一节 电气测量的特点和方法.....	(1)
第二节 电气测量仪器仪表的发展.....	(2)
第三节 测量误差及减小误差的方法.....	(4)
第四节 测量结果的数据处理.....	(6)
思考与练习.....	(9)
第二章 电工仪表的结构和工作原理	(10)
第一节 电工仪表的分类和技术要求	(10)
第二节 电工指示仪表的基本结构和工作原理	(16)
第三节 电工仪表测量机构	(19)
第四节 磁电系检流计	(28)
第五节 整流系仪表的工作原理	(30)
思考与练习	(31)
第三章 电流、电压和电功率的测量.....	(33)
第一节 电流的测量方法	(33)
第二节 电压的测量方法	(38)
第三节 电功率的测量方法	(40)
思考与练习	(44)
技能训练一 直流电流和电压的测量	(46)
技能训练二 并联分流器的电流测量电路	(48)
技能训练三 交流电流和电压的测量	(50)
技能训练四 用3只电流表配电流互感器测量三相线电流	(52)
技能训练五 用钳形电流表测量交流电流	(54)
技能训练六 电压表通过电压换相开关测量三相线电压	(56)
技能训练七 使用电压表核对相序	(57)
技能训练八 用有功功率表测量负载功率	(58)
第四章 指针式万用表的使用	(62)
第一节 指针式万用表的结构和工作原理	(62)
第二节 MF47型万用表的使用与测量	(67)
第三节 万用表使用注意事项	(72)
思考与练习	(73)
技能训练九 万用表的使用	(74)
第五章 电阻的测量	(77)
第一节 常用电阻测量方法	(77)

第二节 直流单臂电桥	(78)
第三节 直流双臂电桥	(81)
第四节 兆欧表	(83)
第五节 接线电阻测量仪	(89)
思考与练习	(97)
技能训练十 用单臂电桥测量电阻	(98)
技能训练十一 测量电动机定子绕组的绝缘电阻	(100)
技能训练十二 用兆欧表测量低压电力电缆的绝缘电阻	(102)
技能训练十三 用兆欧表测量低压电力电容器的绝缘电阻	(104)
技能训练十四 用接地电阻测量仪测量接地装置的接地电阻	(106)
第六章 电度表的使用与电能的测量	(109)
第一节 概述	(109)
第二节 单相电度表	(110)
第三节 单相电度表接线方式的判断	(116)
第四节 单相电度表配电流互感器	(117)
第五节 三相有功电度表原理	(119)
第六节 三相有功电度表配电流互感器的接线	(125)
第七节 三相无功电度表	(127)
第八节 预付费电度表简介	(129)
第九节 复费率电度表	(132)
思考与练习	(136)
技能训练十五 用单相直入式有功电度表测量单相电能	(137)
技能训练十六 用单相有功电度表配电流互感器测量单相电能	(139)
技能训练十七 用3只单相有功电度表测量三相电能(直入式)	(141)
技能训练十八 用直入式三相三线有功电度表测量三相电能	(143)
技能训练十九 三相三线有功电度表配电流互感器测三相电能	(145)
技能训练二十 用直入式三相四线有功电度表测量三相电能	(147)
技能训练二十一 三相四线有功电度表配电流互感器测三相电能	(149)
第七章 其它电工常用仪表	(153)
第一节 频率表	(153)
第二节 相位表、功率因数表、相序表	(154)
第三节 转速表	(158)
第四节 半导体点温计	(160)
思考与练习	(162)
技能训练二十二 用机械式转速表测量机械转速	(162)
技能训练二十三 用半导体点温计测量设备的温度	(163)
第八章 常用电子仪器与使用	(165)
第一节 信号发生器的原理与使用	(165)
第二节 电子示波器	(173)
第三节 电子计数式频率计	(183)
思考与练习	(186)

第一章 电气测量的基本知识

第一节 电气测量的特点和方法

电力工业的主要产品是电能。在电能的生产、传输、分配和使用各环节中，只有采用正确的测量方法和使用各种电气测量仪表对电气参数进行测量，才能对电能质量、负荷情况、电气设备的运行情况等加以监视，保证电力系统、生产设备安全和可靠的运行。

测量就是人们借助专门设备，对客观事物取得数量概念的认识过程，是人们定量地认识客观事物的十分重要的手段。电气测量是指借助测量设备（依据电磁理论制作的电工仪表、依据电子技术的电子测量仪表）对电气参数的测量。用于电气参数测量的仪器仪表称为电气仪器仪表。

随着现代科学技术的不断发展，电气测量的使用日益广泛和普遍。这是因为电气测量技术与其它测量技术相比，有以下明显的特点：

一是测量对象的广泛性。电气测量既可以测量各种电量（如电流、电压、功率等）和电参数（如电阻、电容、电感等），也可以测量各种非电量（如温度、压力、流量等）。

二是测量过程的连续性。采用电气测量技术可以对被测量连续进行测量，并利用记录仪仪表把被测量随时间的变化记录下来，这样便于对生产过程的各种状态进行监视。

三是测量方法的多样性。对同一电气参数的测量，可采用多种不同的方法，如可以借助于各种类型的传感器，对远距离的、人体难以接近的地方（如工业电炉内高温部位的温度）或不能达到的地方（如星球表层的电阻率）进行测量，即所谓遥测。

一个电气参数的测量可以用不同的方法来实现。测量方法的选择，与电气参数的特性、测量条件以及准确度要求有关。根据获得测量结果的方法不同，一般将测量方法分为以下几类：

① 直接测量法

使用有相应单位刻度的仪表对被测量进行测量，能够直接获得被测量大小的测量方法叫直接测量法。例如用电流表测量电流，用电压表测电压，用欧姆表测电阻等，都属于直接测量法。直接测量法广泛用于工程测量中。

② 间接测量法

通过测量几个与被测量具有一定函数关系的物理量，然后按函数关系计算出被测量

的大小,这种测量方法叫间接测量法。例如用伏安法测量电阻时,先用电压表和电流表分别测量出电阻两端的电压 U 和通过该电阻的电流 I ,然后根据欧姆定律 $I = \frac{U}{R}$ 计算出被测电阻 R 的大小。

③ 比较测量法

将被测量与标准量进行比较,从而获得被测量的大小的测量方法叫比较测量法。根据被测量与标准量(标准量具之值)的比较方法不同,比较测量法又分为以下几种:

1. 差值法 通过测量被测量与标准量的差值,或正比于此差值的量,然后根据标准量来确定被测量大小的方法叫差值法。例如用电桥测电阻。

2. 零值法 在测量过程中,改变标准量使它和被测量的差值为 0,确定被测量与标准量大小相等,这种测量方法叫做零值法。例如用电位差计测量电动势。

3. 替代法 在测量过程中,用已知标准量去替代被测量,使仪表的指示值恢复到原状态,这时被测量等于已知标准量,这种测量方法叫做替代法。

比较法测量的准确度高,但操作麻烦,设备复杂,一般常用于精密测量和仪表校验。

第二节 电气测量仪器仪表的发展

一、发展简史

从 1752 年世界上第一台测量电荷的电工仪表问世以来,到现在已有近 250 年的历史。今天,电气测量仪器仪表已有相当高的水平。

在 20 世纪 20 年代以前使用的一些电工仪表,只能进行电压、电流、电阻等电气参数的简单测量。20 年代以后,随着电子管的广泛采用,使仪表的测试灵敏度、内阻、频率范围均有较大提高。但用电子管制作的仪器仪表体积大,笨重,携带不方便。

50 年代后,半导体技术得到迅速发展,使制作的晶体管仪器体积、重量大为减少,但由于多采用指针式,测量速度慢,误差较大。因此晶体管仪器仪表不能满足高速和精密测量的要求。

70 年代后,随着集成电路和大规模集成电路的发展,出现了许多数字式仪表,使测量速度更快,准确度也有很大提高,仪器、仪表的体积更小,重量更轻,使用携带更方便了。

二、发展趋势

电气测量技术的发展是与科学技术、生产技术的发展相辅相成、相互促进的。一方面科学技术和生产的发展,对电气测量仪器仪表的要求愈来愈高,也为其提供了新原理,新材料,新工艺,加速了新型现代化仪器仪表的研制、生产和使用;另一方面,每一种新型的,先进的电气测量仪器仪表或测量方法的出现,又反过来大大促进了科学技

术和生产技术的迅速发展。

可以预言,今后随着科学技术和生产技术的发展,电气测量技术将继续不断发展,日趋完善,走向现代化。就电气测量仪器仪表而言,其发展趋势为:高性能、多功能、集成化、数字化、自动化、智能化。

(一) 高性能

近年来各种电气测量仪器仪表的主要性能和技术指标,如测量范围、准确度、灵敏度、稳定性、频带宽度、分辨力等都有很大提高。例如测量的最高频率可达 15×10^{10} Hz,测量的最大电阻可达 $10^{18} \Omega$ 。随着科学技术的发展与进步,尤其是信息技术、空间技术、遥感技术、激光技术和微电子技术的发展,势必要求电气测量仪器仪表继续提高其技术性能,朝着高准确度、高灵敏度、高稳定性、高可靠性等高性能的方向发展。

(二) 集成化

电气测量仪器仪表在六七十年代使用了集成电路,到了90年代,大规模集成电路更是在各种测量仪器仪表中广泛使用。使电气测量仪器仪表的小型化、轻量化有了很大进步,如功能相近的示波器从原来使用电子管到现在使用集成电路,体积减小了 $2/3$,重量也由原来的几十千克下降到几千克,因而集成化仍然是电气测量仪器仪表的发展方向之一。

(三) 多功能

电气测量设备的多功能(即一种仪表能够测量多个电气参数)的设想是在50年代提出来的,1953年出现了插件式示波器。70年代,插件式结构被多种仪器仪表所采用,且有了很大改进和创新。例如通用计数器通过更换插件后,可以用来测量频率、周期、频率比、电压、电流、相位等多种参数。随着集成电路技术的发展,多功能的测量设备相继出现,从而为电气测量仪器仪表的多功能化开辟了更为广阔的前景。

(四) 数字化

电气测量仪器仪表向数字化发展,其优点是读数准确、直观、分辨力高,响应速度快,从而提高了测量效率。另外,由于数字仪器仪表便于程序控制和数据处理,这就为与计算机结合实现自动测量、自动控制提供了很好的条件,所以,电气测量仪器仪表的数字化,不仅将逐步代替指针式仪表和游标式读盘,更重要的是为仪器仪表的程序化、自动化提供了可靠的保证。

(五) 自动化

大型自动化测试系统早在1958年就开始研究,60年代后期得到迅速发展,现在已经在科研部门使用。例如一种自动网络分析系统,采用通用测量程序可测出7种微波元件的26个微波参数,全部测量结果可由显示器立即显示出来,同时打印在数据表格上。测量时间只需20秒。该系统还可以修正系统误差,不仅提高了测量准确度,同时效率也提高了。总之,自动化测量的内容十分丰富,涉及的领域非常的广泛。随着科学技术的进步,自动化测量系统将会有更大的发展。

(六) 智能化

电气测量仪器仪表就其发展过程来说,经历了3个阶段:第一阶段是模拟仪表;第二阶段是数字式仪表;第三阶段是智能仪表。智能仪器仪表是随外界条件变化而具有正

确反应能力的仪器仪表，它包括理解、推理、判断、分析等一系列功能，是数字、逻辑知识的综合分析的结果。如智能示波器，智能电压表，智能电度表等多种智能仪器。它把微电脑与传统的仪器仪表结合起来，能适应被测量的变化，自动补偿、自动选择量程、自动校准、自动寻找故障、自动进行指标判断、自动进行逻辑操作、定量控制及程序控制等。它打破了仪器仪表的传统观念，成为仪器仪表发展的一个新趋势。

第三节 测量误差及减小误差的方法

在实际测量中，由于测量工具不够准确，测量方法不够完善以及各种其它因素的影响，例如测量者的经验和识别能力的局限性，测量结果不可能是被测量的真实值，而只是它的近似值，测量值与被测量的真值之间的差异叫做测量误差。

一、测量误差的表示方法

电气测量误差的表示方法有 3 种：绝对误差、相对误差和引用误差，下面分别介绍。

(一) 绝对误差

仪表的指示值（测量值） A_x 与实际值（真实值） A_0 之间的差值称为绝对误差，以 ΔA 表示，即：

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

计算 ΔA 时，通常把标准仪表的指示值当做被测量的实际值。由式 1-1 可得：

$$A_0 = A_x + \Delta A \quad (1-2)$$

令 $C = -\Delta A$ ，则

$$A_0 = A_x + C \quad (1-3)$$

C 叫做更正值（或修正值），它与绝对误差大小相等，符号相反。引入更正值后，可以对仪表的指示值进行校正，以消除误差。

(二) 相对误差

绝对误差 ΔA 与实际值 A_0 之比称为相对误差。相对误差单位为“1”，通常用百分数来表示，用符号 γ 表示相对误差。则：

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

因而当实际值难以确定时，可以用仪表指示值代替，这时的相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_x} \times 100\% \quad (1-5)$$

例 有一电源电压实际值为 200 V，用甲电压表测量时指示值为 202 V，用乙电压表测量时指示值为 201 V，而用 C 电压表测量一个实际值为 20 V 的电源电压时，电压表指示值为 19.5 V。试分别求它们的绝对误差和相对误差。

解：

$$\Delta A_{\text{甲}} = 202 \text{ V} - 200 \text{ V} = 2 \text{ V}$$

$$\gamma_{\text{甲}} = \frac{\Delta A_{\text{甲}}}{A_0} \times 100\% = \frac{2}{200} \times 100\% = 1\%$$

$$\Delta A_{\text{乙}} = 201 \text{ V} - 200 \text{ V} = 1 \text{ V}$$

$$\gamma_{\text{乙}} = \frac{\Delta A_{\text{乙}}}{A_0} = \frac{1}{200} \times 100\% = 0.5\%$$

$$\Delta A_{\text{C}} = 19.5 \text{ V} - 20 \text{ V} = -0.5 \text{ V}$$

$$\gamma_{\text{C}} = \frac{\Delta A_{\text{C}}}{A_0} \times 100\% = -\frac{0.5}{20} \times 100\% = -0.25\%$$

由以上计算可知,测量同一个量(例如甲表和乙表),绝对误差愈小结果愈准确。如果测量大小不同的量(例如甲表和C表),用绝对误差不能比较测量结果的准确度,而只有用相对误差才能比较测量结果的准确度。相对误差的绝对值愈小,表示测量的准确度愈高。

(三) 引用误差

相对误差可以表示测量结果的准确度但却不能反映仪表本身的准确程度。这样便提出了引用误差的概念。绝对误差与测量仪表的量程之比称为引用误差,一般用 γ_m 表示(结果用百分数表示),即:

$$\gamma_m = \frac{\Delta A}{A_m} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 A_m 是代表测量仪表的量程,也就是满刻度值。由于引用误差的分母是固定的,故用引用误差来比较测量不同大小的被测量之间的准确程度就比较简便了。

二、误差的分类和来源

根据误差性质的不同,测量误差一般可分为三类,每一类误差产生的原因各不相同。

(一) 系统误差

系统误差是指在同一条件下,多次测量同一被测量时,误差大小和符号均保持不变;或条件改变时,其误差按某一确定规律而变化。系统误差主要是由于测量仪器仪表的准确度、测量方法的不完善和测量环境等引起的。

(二) 随机误差

随机误差又称偶然误差,它是指在相同条件下多次重复测量同一量时,误差时大时小,符号时正时负,没有确定的变化规律,无法控制也不能预知其大小和符号的误差。

随机误差的来源和系统误差相同,所不同的是随机误差的产生是由于各种互不相干的独立因素随机起伏变化而引起的。例如,磁场的微变、温度的微变、大地的微震、空气流的变化扰动等,都会产生随机误差。

(三) 疏失误差

疏失误差是一种严重歪曲了测量结果的异常误差。疏失误差的来源主要是测量者的粗心、疏忽所造成。例如:不正确的操作方法;读数错误,记错、算错数据等。

三、减小误差的方法

测量误差是不能消除的，但要尽可能使误差减小到测量允许的范围内。减小测量误差，应根据误差的来源和性质采取相应的措施和方法。

(一) 减小系统误差的方法

1. 对测量仪器仪表进行校正，在准确度要求高的测量中，引用修正值进行修正。
2. 消除产生误差的根源。正确选择测量方法和测量仪器，尽量使测量仪器在规定的使用条件下工作，消除各种外界因素造成的影响。
3. 采用特殊的测量方法。实际测量中可根据测量仪器仪表不同，被测量不同，采用不同的测量方法来达到减小误差的目的。如正、负误差补偿法，等值替代法，换位消除法，对称观测法等。例如用电流表测电流时，考虑到外磁场对读数的影响，可以把电流表放置的位置转动 180° ，分别进行两次测量。两次测量中，必然出现一次读数较大而另一次读数较小，取两次读数的平均值作为测量结果，其正、负误差抵消，可以有效的减小外磁场对测量结果的影响。

(二) 减小随机误差的方法

随机误差都服从统计规律。统计规律的性质之一是：随着测量次数的增多，绝对值相等、符号相反的随机误差，出现的次数趋于相等。特别是当测量次数趋于无穷时，其误差总体平均值趋近于 0，这一性质称为随机误差的抵消性。根据这一特性，我们可以借助增加重复测量的次数，来减小随机误差。

(三) 疏失误差的防止

防止产生疏失误差，首先要求测量者应以高度的工作责任心和严格的科学态度从事测量工作；其次应严格按测量操作程序和操作规程进行测量工作；最后，应对测量结果进行校对，若测量中出现了疏失误差，则该测量结果应该抛弃。

第四节 测量结果的数据处理

一、有效数字的概念

在测量、记录和进行计算时，必须掌握对测量数据的正确取舍方法。不能认为一个数据中小数点后面的位数越多，这个数据就越准确，也不能认为计算测量结果中保留的位数越多，这个数据就越准确。因为测量结果都是近似值，这些近似值通常都是用有效数字的形式表示的。

所谓有效数字，是指从数字左边第一个非 0 的数字开始，直到右边最后一个数字为止所包含的所有数字（包括 0）。例如，测得某信号源的频率为 $0.012\ 04\ \text{MHz}$ ，左边第一个非零数字为 1，右边最后一个数字为 4，有 1、2、0、4 共 4 位有效数字。其左边的两个“0”不是有效数字，数字中间的“0”是有效数字。

数字末尾有“0”也是有效数字。如电阻 $4\ 800\ \Omega$ ，有 4 位有效数字。但如果写成

$4.8 \times 10^3 \Omega$, 就只有 2 位有效数字, 这是不许可的。要变换单位, 应该保持有效数字的位数不变。因而电阻 4800Ω 应写为 $4.800 \times 10^3 \Omega$ 或 $4.800 \text{ k}\Omega$ 。所以数字末位的“0”不可随意增减。

二、有效数字的正确表示

测量时记录的有效数字一般由两部分组成, 前几位数字是准确可靠的, 称为可靠数字 (也称为准确数字), 最后一位数字一般是在测量读数时估计出来的, 称为可疑数字 (也称欠准数字)。有效数字的正确表示应注意以下三点:

1. 有效数字中, 只应保留一个欠准数字。在测量时, 我们总是根据仪表的刻度和指针的位置来读取数据的。例如, 用一只分为 50 刻度, 量程为 50 V 的电压表去测量某一电压, 指针停留在第 45 刻度与第 46 刻度之间, 读取的电压为 45.6 V。则该电压是用三位有效数字来表示的, “4”和“5”两个数字是可靠的, 而“6”是根据最小刻度估计出来的, 它可能被估计为 5, 也可能被估计为 7, 因而“6”是欠准数字。在记录测量数据时, 只需记录可靠数字和 1 位根据仪表最小刻度而估计得来的欠准确数字。

2. 欠准数字中, 要特别注意“0”的处理, 不能随意增减。例如, 测量某电阻的数值为 5120Ω , 表明前面三个位数 5、1、2 是可靠数字, 最后一位数字 0 是欠准数字。如果改写成 $5.12 \text{ k}\Omega$, 则表明前两个数字 5、1 是可靠数字, 最后一个数字 2 是欠准数字。这两种写法, 尽管表示同一数值, 但却反映了不同的测量准确度。

3. 如果用 10 的方幂来表示一个数据, 10 的方幂前面数字左边第一个非零的数字开始, 直到右边 10 的方幂处的所有数字都是有效数字。例如: 电阻 $9.10 \times 10^3 \Omega$, 表明它有 3 位有效数字; 电流 $0.03456 \times 10^3 \text{ A}$, 表明它有 4 位有效数字。

三、有效数字的处理

对于测量或计算取得的数据, 必须进行处理。如果只取 n 位有效数字, 那么第 $n+1$ 位及其以后的各位数字采用“四舍六入五配偶”法则进行处理。方法是: 对于 $n+1$ 位的数字是 4 及 4 以下的数字舍去, 6 及 6 以上的数字进入。对于 $n+1$ 位是 5, 而 5 后有数字时, 则可舍 5 进 1; 若 5 后无数字或为 0, 5 之前为奇数时舍 5 进 1, 5 之前为偶数时 (包括 0) 舍去 5 不进。这里所以采用偶数法则, 一方面偶数常能被其它除数除尽, 可以减少计算上的误差; 另一方面按此法则舍入时, 当被加数的个数很多时, 正、负舍入误差出现的机会相等, 而在总和中, 舍入误差将被抵消。

下面是把有效数字保留到小数点后第 2 位的几个例子:

84.9523……84.95 (四舍, 小数点后第 3 位为 4 以下数字)

5.8261……5.83 (六入, 小数点后第 3 位为 6 及 6 以上数字)

24.3751……24.38 (舍五进一, 小数点后第 3 位为 5, 5 后有数字)

34.635……34.64 (舍五进一, 小数点后第 3 位为 5, 5 后无数字, 5 前为奇数)

82.745……82.74 (舍五不进, 小数点后第 3 位为 5, 5 后无数字, 5 前为偶数)

四、有效数字的运算

(一) 加减运算

在电气测量中,参加加减运算的各数据,必须是单位相同的同一物理量。在进行加减运算之前,一要统一单位,二要对数据进行处理:使各数据小数点后面有效数字位数比小数点后位数最少的那个数据多1位。运算后,和或者差的小数点后的有效数字,应与运算前小数点后位数最少的那个数据相同。

例 求 423.25、62.345、0.015 3、4.805 等 4 个数据之和。

数据 423.25 小数点后有 2 位有效数字,为小数点后位数最少的数据,所以应对其余数据进行处理,使小数点后保留 3 位有效数字。

$$\begin{array}{r} \text{解: } 423.25 \cdots \cdots 423.25 \\ 62.345 0 \cdots \cdots 62.345 \\ 0.015 3 \cdots \cdots 0.015 \\ 4.805 \cdots \cdots 4.805 \\ \hline +) \\ \hline 490.415 \cdots \cdots 490.42 \end{array}$$

(二) 乘除运算

运算前对各数据的处理应以有效数字最少的为标准,所得积或商的有效数字位数应与有效数字位数最少的那个数据相同。

例 $25.726 \times 1.057 82 \times 0.038 2$

解: 其中 0.0382 为 3 位有效数字,位数最少,所以应对其它两个数据进行处理:

$$\begin{array}{r} 25.726 \cdots \cdots 25.7 \\ 1.057 82 \cdots \cdots 1.06 \end{array}$$

故 $25.7 \times 1.06 \times 0.038 2 = 1.040 644 4 \cdots \cdots 1.04$

若有效数字位数最少的数据中,其第一位有效数字是 8 或 9 时,则其它数据的有效数字应多计 1 位。例如上题中 0.038 2 改为 0.098 2,则另外两个数据应取 4 位有效数字,即 $25.726 \rightarrow 25.73$, $1.057 82 \rightarrow 1.058$ 。

五、测量结果的数据处理

电气测量结果的数据处理按下列步骤进行:

1. 把测量数据按测量的先后次序列表。

2. 计算出算术平均值。根据最小二乘法原理可知,测量结果的表示以多次测量同一被测量的算术平均值为最可靠。测量次数越多则测量结果的可靠程度越高。若每次测量结果用 a_i 表示, $i=1, 2, 3, \cdots, n$, n 为测量次数,那么测量结果的平均值表示式为:

$$\bar{A} = \frac{\sum a_i}{n} \quad (1-7)$$

3. 计算每次测量的绝对误差。把某次测量结果与测量结果平均值相减得出某次测

量的绝对误差, 即:

$$\epsilon_i = a_i - \bar{A} \quad (1-8)$$

4. 计算均方根误差。对同一被测量进行多次测量, 测量结果的误差按均方根误差计算最为合理, 其表达式为:

$$\delta_y = \sqrt{\frac{\sum \epsilon_i^2}{n}} \quad (1-9)$$

5. 剔除疏失误差。把均方根误差与各个绝对误差进行比较, $3\delta_y$ 的测量结果 (这些项被视为疏失误差), 再重新计算平均值和均方根误差, 直至达到各项绝对误差都小于 $3\delta_y$ 为止。

6. 写出测量结果和测量误差的统一表达式:

$$A = \frac{\sum a_i}{n} \pm \sqrt{\frac{\sum \epsilon_i^2}{n}} = \bar{A} \pm \delta_y \quad (1-10)$$

思考与练习

1. 简述电气测量的特点。
2. 什么是比较测量法? 它分哪几类?
3. 误差有哪几种表示方法? 各表示什么含义?
4. 用一只量程为 2 A 的电流表对实际值为 1 A 的电流进行测量, 电流表指示值为 0.98 A, 求测量的绝对误差、相对误差和引用误差。
5. 误差的来源有哪些? 如何减小误差?
6. 根据有效数字运算规则计算下列各式:
 - (1) $17.12 + 4.5291 + 0.072398$
 - (2) $1.465 + 11.3 + 34.735 + 0.125004$
 - (3) $3.9728 \times 1.41 \times 5.3525$
 - (4) $113.05 + 47.225 + 0.0075 + 373.407$
 - (5) $0.056 \times 13.56 \times 1.625 \times 0.835$
7. 如何进行测量结果的数据处理?