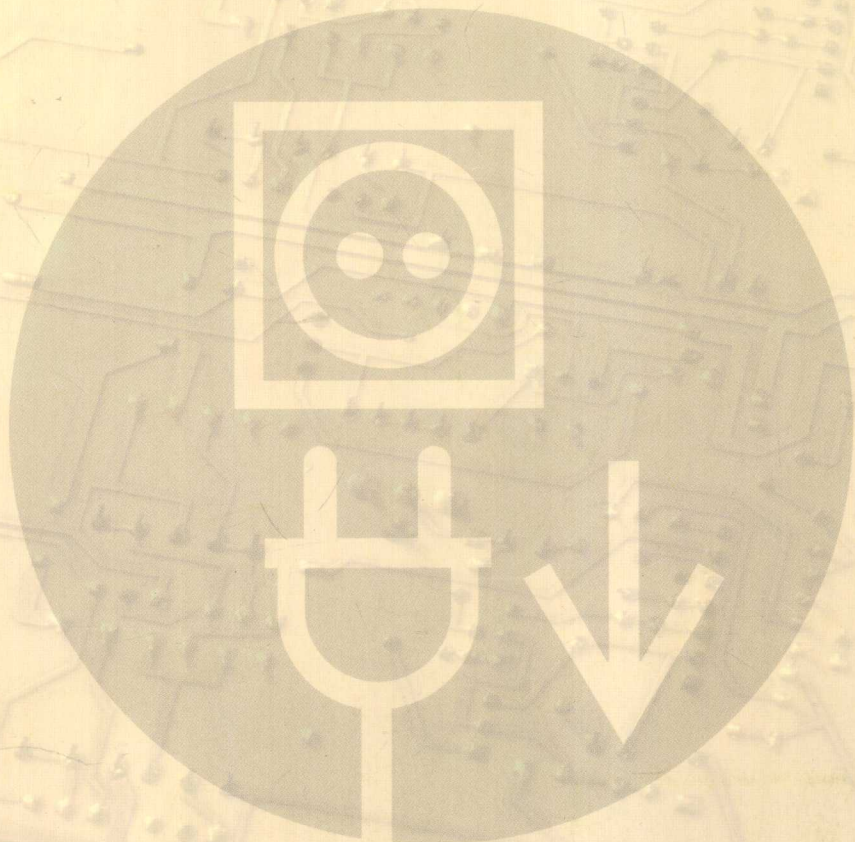


全国高等职业院校电工类专业教材

QUANGUO GAODENG ZHIYE JISHU YUANXIAO DIANGONGLEI ZHUANYE JIAOCAI

# 电气测量

DIANQI CELIANG



中国劳动社会保障出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电气测量/陈惠群主编. —北京: 中国劳动社会保障出版社, 2004

全国高等职业院校电工类专业教材

ISBN 7-5045-4277-6

I. 电… II. 陈… III. 电气测量-高等学校: 技术学校-教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 009129 号

**中国劳动社会保障出版社出版发行**

(北京市惠新东街 1 号 邮政编码: 100029)

出版人: 张梦欣

\*

北京市艺辉印刷有限公司印刷装订 新华书店经销

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 310 千字

2004 年 3 月第 1 版 2006 年 1 月第 4 次印刷

印数: 5000 册

定价: 19.00 元

读者服务部电话: 010-64929211

发行部电话: 010-64911190

出版社网址: <http://www.class.com.cn>

版权专有 侵权必究

举报电话: 010-64911344

# 前言

---

为贯彻落实《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》，推进高等职业技术教育更好地适应经济结构调整、科技进步和劳动力市场的需要，推动高等职业技术学院实施职业资格证书制度，加快高技能人才的培养，劳动和社会保障部教材办公室在充分调研和论证的基础上，组织编写了高等职业技术学院系列教材。从2004年起，陆续推出数控类、电工类、模具设计与制造、电子商务、电子类、烹饪类专业教材，并将根据需要不断开发新的教材，逐步建立起覆盖高等职业技术学院主要专业的教材体系。

在高等职业技术学院系列教材的编写过程中，我们始终坚持了以下几个原则：一是坚持高技能人才的培养方向，从职业（岗位）分析入手，强调教材的实用性；二是紧密结合高职院校、技师学院、高级技校的教学实际情况，同时，坚持以国家职业资格标准为依据，力求使教材内容覆盖职业技能鉴定的各项要求；三是突出教材的时代感，力求较多地引进新知识、新技术、新工艺、新方法等方面的内容，较全面地反映行业的技术发展趋势；四是打破传统的教材编写模式，树立以学生为主体的教学理念，力求教材编写有所创新，使教材易教易学，为师生所乐用。

电工类专业教材主要包括《电工基础》《电子技术》《工程制图》《电气测量》《电气管理知识》《数控技术》《单片机原理与接口技术》《可编程控制技术》《工厂电气控制技术》《自动控制技术》《工厂变配电技术》《电机原理与维修》《变频技术》《高级维修电工基本技能训练》《高级维修电工专业技能训练》《高级维修电工综合技能训练》《高级电工技能训练》《高电压技术（2005年出版）》《电气设备安装技术（2005年出版）》等，可供高职院校、技师学院、高级技校电气维修、企业供电等专业使用。教材的编写参照了《维修电工》以及其他相关的国家职业标准，有些教材还配套出版了习题册。

在上述教材编写过程中，我们得到有关省市劳动和社会保障部门、教育部门，以及高等职业院校、技师学院、高级技校的大力支持，在此表示衷心的感谢。同时，我们恳切希望广大读者对教材提出宝贵的意见和建议，以便修订时加以完善。

劳动和社会保障部教材办公室

2004年2月

## 简介

---

本书为全国高等职业技术学院电工类、电气维修、企业供电（三选一）专业教材，供各类高职院校、技师学院、高级技校相关专业使用。主要内容有：电气测量的基本知识，电工仪表的基本知识和常用电工测量方法，常用电子仪器和数字式仪表的基本原理和使用方法，常用传感器的结构及原理，常用非电量的测量方法以及智能仪器的基本组成及原理等。

本书也可用于高级技术人才培养。

本书由陈惠群主编，马伟、陈怡、程远、李伟参加编写；卢光飞审稿。

---

# 目录

---

<b>第一章 电气测量的基本知识</b> .....	( 1 )
§ 1—1 绪言 .....	( 1 )
§ 1—2 电气测量的方法 .....	( 2 )
§ 1—3 测量误差及其消除 .....	( 3 )
§ 1—4 测量数据的分析处理 .....	( 6 )
<b>第二章 电工仪表与测量</b> .....	( 12 )
§ 2—1 电工测量的基本知识 .....	( 12 )
§ 2—2 电流与电压的测量 .....	( 18 )
§ 2—3 电阻的测量 .....	( 20 )
§ 2—4 电功率和功率因数的测量 .....	( 26 )
§ 2—5 电能的测量 .....	( 31 )
§ 2—6 万用电桥 .....	( 39 )
<b>第三章 电子仪器与测量</b> .....	( 46 )
§ 3—1 低频信号发生器 .....	( 47 )
§ 3—2 脉冲信号发生器 .....	( 50 )
§ 3—3 电子电压表 .....	( 55 )
§ 3—4 双踪示波器 .....	( 59 )
§ 3—5 晶体三极管低频 $h$ 参数测量仪 .....	( 72 )
§ 3—6 晶体管特性图示仪 .....	( 76 )
§ 3—7 数字式电压表和万用表 .....	( 85 )
§ 3—8 数字式频率计 .....	( 101 )
<b>第四章 非电量的电气测量</b> .....	( 109 )
§ 4—1 概述 .....	( 109 )
§ 4—2 电阻式传感器 .....	( 113 )
§ 4—3 电感式传感器 .....	( 119 )
§ 4—4 电容式传感器 .....	( 124 )
§ 4—5 磁电式传感器 .....	( 126 )
§ 4—6 压电式传感器 .....	( 128 )
§ 4—7 霍尔式传感器 .....	( 131 )

§ 4—8 光电式传感器	(134)
§ 4—9 温度传感器	(139)
* § 4—10 气体传感器	(145)
* § 4—11 新型传感器	(149)
<b>* 第五章 智能仪器</b>	<b>(153)</b>
§ 5—1 智能仪器的特点	(153)
§ 5—2 智能仪器的结构及原理	(154)
§ 5—3 自动测试系统	(155)
§ 5—4 智能化数字存储示波器	(156)
<b>实验</b>	<b>(175)</b>
实验一 接地电阻的测量	(175)
实验二 万用电桥的使用	(176)
实验三 电子电压表的使用	(177)
实验四 示波器与信号发生器及电子电压表的联合使用	(178)
实验五 电子线路的测量	(179)
实验六 脉冲信号发生器与示波器的使用	(180)
实验七 晶体管特性图示仪的使用	(180)
实验八 电子计数器的使用	(181)
实验九 智能温度控制系统的安装与调试	(183)
实验十 应变片式压力传感器的使用	(187)
实验十一 温度传感器的使用	(188)
实验十二 BK 型测力/称重传感器的使用	(189)
实验十三 电位器式传感器的使用	(190)
实验十四 霍尔式传感器的使用	(191)
* 实验十五 数字存储示波器的使用	(193)

## § 1—1 绪 言

### 一、电气测量课的内容及重要性

电气测量是高职、高专、高级技工学校电工类专业的一门专业课。作为电工，接触最多的当然是“电”，但“电”不像一般物质那样看得见、摸得着。因此，在电能的生产、传输、变配以及使用过程中，必须通过各种电工仪器仪表对电能的质量及负载运行情况进行测量，再对测量结果进行分析，以保证供电及用电设备和线路可靠、安全、经济地运行。所以，学习电气测量对电工来讲，具有十分重要的意义。同时，由于传感器测量技术是最近几十年发展起来的一门新兴学科，已经广泛应用于科研、工厂等生产一线的现代化设备中，所以，有必要了解传感器的基本知识。

本课程内容包括：电工测量方法的选择，测量数据的处理，常用电工测量用的模拟式和数字式仪表，电子仪器的结构、工作原理和使用方法，非电量的电气测量等。通过本课程的学习，可以掌握电工测量的正确方法，掌握选择和使用常用电工测量仪表和仪器的基本能力，掌握传感器的基本原理和应用，了解智能仪器的基本组成及应用等。

### 二、电气测量仪表的发展概况

电气测量仪表的发展至今已经发展到第三代。第一代仪表是模拟式仪表，亦称指针式仪表。19世纪20年代前后，随着“电流对磁针有力的作用”的发现，人们相继制造出了检流计、惠斯登电桥等最早的电工指示仪表。1895年设计制造出世界上第一台感应系电能表。20世纪40~50年代，由于新材料的出现，使电工仪表在准确度方面有所提高。60年代出现了0.1级的电磁系、电动系和磁电系仪表。模拟式仪表具有结构简单、工作可靠和价格便宜等优点，这类仪表在电工测量中一直被广泛使用。

第二代仪表是数字式仪表。20世纪50年代初，电子技术的发展为电工仪表的发展提供了有力的支持。1952年，世界上第一只电子管数字式电压表问世；60年代生产出晶体管数字式电压表；70年代研制出中、小规模集成电路的数字式电压表。近年来，又相继推出了由大规模集成电路和超大规模集成电路构成的数字式电压表，它们以高准确性、高可靠性、高分辨率等特性备受人们的青睐。数字式仪表正进入一个蓬勃发展的时期。作为数字式仪表的核心，数字式电压表已被广泛应用于电工测量领域。

第三代仪表是智能式仪表。所谓的智能式仪表，实际上就是能随外界条件改变而具有正确反应能力的仪表。目前，由于电子技术、计算机和信息处理技术的综合应用，电工测量技术正向自动化、智能化的方向迅猛发展。特别是传感器技术的快速发展，使得人们可以比较

方便地将各种非电量转换成电信号，再利用电工仪表进行测量，从而进一步拓宽了电气测量的范围。因此，电工仪表在非电量测量中也得到了广泛的应用。

目前，传感器正向以下几个方向发展：

#### 1. 智能化

智能化传感器是传感器与计算机结合的产物，它具有测量、数据处理、逻辑判断、自校准等功能，一般还具有与其他计算机通信的功能。

#### 2. 集成化

集成化传感器有两种类型：一种是传感器与放大器、运算器及温度补偿电路等集成在一块芯片上，这样既减小了体积，又增加了抗干扰能力；另一种是将同一类传感器集成在一块芯片上，构成二维阵列式传感器，例如，CCD（电荷耦合器件）图像传感器。

#### 3. 小型化

随着半导体集成技术的发展，使传感器正向小而轻的方向发展。

#### 4. 高精度

为了能使测量结果更准确，必须提高传感器的精度。追求传感器的高精度，是今后传感器发展的一个目标。现在一般传感器的精度可达到0.1%，高精度传感器已达到0.02%。

### 习题 1—1

1. 电气测量包括哪些内容？
2. 电气测量仪表的发展经过了几代？各代的仪表都是什么？
3. 传感器的发展趋势是什么？

## § 1—2 电气测量的方法

所谓电气测量就是把被测量与同类标准量进行比较，从而确定出被测量大小的过程。在测量中实际使用的标准量是测量单位的复制体，称为度量器。如标准电池、标准电阻、标准电感就分别是电动势、电阻和电感的复制体。度量器按精度和用途的不同，分为基准度量器和标准度量器。基准度量器是现代科学技术所能达到的精度最高的度量器，由各国最高的计量部门保存。为保证测量仪表的准确一致，还需要建立不同等级的标准度量器，以使用来检定低一级的测量仪表。

在测量过程中按度量器是否直接参与，以及如何获得测量结果，可形成不同的测量方法。常用的电气测量方法主要有直接测量、间接测量和组合测量三种。

### 一、直接测量法

直接测量法是被测量与同类标准量相比较的一种方法，其结果可以从一次实验数据中直接求得。直接测量法按照度量器是否直接参与又可分为直读法和比较法两种。

直读法是指在测量过程中无须度量器直接参与的一种测量方法，如用电流表测电流，欧姆表测电阻等就属于直读法。直读法的优点是方法简便，读数迅速。但由于仪表接入被测电路后会电路的工作状态发生变化，因而这种测量方法的准确度较低。



比较法是在测量过程中需要度量器直接参与的一种测量方法，根据被测量与标准量比较方式的不同，比较法又分为零值法、差值法和代替法三种。

#### 1. 零值法

在测量过程中，通过改变标准量，使其与被测量相等（即二者差值为零），从而确定被测量数值的方法称为零值法。如用电桥测电阻就属于这种方法。

#### 2. 差值法

利用被测量与标准量的差值作用于测量仪表，从而确定被测量数值的方法，称为差值法。如用不平衡电桥测电阻就属于这种方法。

#### 3. 代替法

在测量过程中，用已知标准量代替被测量，若能维持仪表原来的读数不变，则被测量必等于已知标准量。

比较法的优点是准确度高。缺点是设备复杂，操作烦琐，通常适用于要求准确度较高的场合。

### 二、间接测量法

测量时先测量与被测量有关的电量，然后通过计算才能求得被测量数值的方法，称为间接测量法。例如，测量导体的电阻率  $\rho$  时，可以先测量电阻  $R$ 、导体长度  $l$ 、截面积  $S$ ，再根据公式  $\rho = RS/l$  间接求得导体的电阻率。另外还有用伏—安法测量电阻，用测量晶体管发射极电压的方法求放大器静态工作点  $I_c$  的方法，都属于间接测量法。

间接测量法的误差较大，但在准确度要求不高的一些特殊场合应用却十分方便。

### 三、组合测量法

组合测量是兼用直接测量法和间接测量法的一种方法，测量时将被测量和另外几个量组成联立方程，通过直接测量和间接测量得到的数据代入联立方程组后求解方程，从而得到被测量的值。

## 习题 1—2

1. 何谓电气测量？
2. 常用的电气测量方法有哪几种？
3. 何谓度量器？
4. 按精度和用途不同度量器分哪几种？

## § 1—3 测量误差及其消除

### 一、误差的表示方法

在实际测量时，无论哪种电工仪器仪表，也不论其质量多高，它的测量结果与被测量的实际值之间总会存在一定的差值，这个差值称为误差。准确度是指仪器仪表的测量结果与实际值的接近程度。可见，仪器仪表的准确度越高，误差越小。误差值的大小可以用来反映仪器仪表本身的准确程度，在仪器仪表的技术参数中，准确度就被用来表示仪器仪表的基本

误差。

### 1. 仪器仪表的误差

根据产生误差的原因，仪器仪表的误差分两类：

(1) 基本误差 仪器仪表在正常工作条件下（指规定的温度和放置方式，没有外电场和外磁场的干扰等），由于本身结构、工艺等方面的不完善而产生的误差称为基本误差。如仪表活动部分的摩擦、标度尺刻度不准、零件装配不当等原因造成的误差，都属于基本误差。基本误差是仪器仪表本身所固有的误差。

(2) 附加误差 在非规定的工作条件（如温度、频率、波形的变化超出规定的条件，工作位置不当或存在外电场和外磁场的影响时）下使用而产生的误差称为附加误差。附加误差实际上是一种因外界工作条件改变而造成的额外误差。

### 2. 误差的表示方法

误差通常用绝对误差、相对误差和引用误差来表示。

(1) 绝对误差  $\Delta$  仪表的指示值  $A_x$  与被测量实际值  $A_0$  之间的差值，称为绝对误差，用  $\Delta$  表示。即

$$\Delta = A_x - A_0$$

在计算  $\Delta$  值时，通常可用标准表的指示值作为被测量的实际值。

**例 1** 用一只标准电压表来校验甲、乙两只电压表，当标准表的指示值为 220 V 时，甲、乙两表的读数分别为 220.5 V 和 219 V，求甲、乙两表的绝对误差。

**解：**

$$\text{甲表的绝对误差} \quad \Delta_1 = A_x - A_0 = 220.5 \text{ V} - 220 \text{ V} = 0.5 \text{ V}$$

$$\text{乙表的绝对误差} \quad \Delta_2 = A_x - A_0 = 219 \text{ V} - 220 \text{ V} = -1 \text{ V}$$

结果表明，绝对误差有正负之分。正误差说明仪表指示值比实际值大，负误差说明指示值比实际值小。另外，甲表的指示值偏离实际值较小，而乙表偏离实际值较大，说明甲表的指示值比乙表更准确。在测量同一被测量时，可以用绝对误差的绝对值  $|\Delta|$  来比较不同仪表的准确程度， $|\Delta|$  愈小的仪表愈准确。

由  $\Delta$  计算公式可得

$$A_0 = A_x - \Delta = A_x + (-\Delta) = A_x + C$$

上式中的  $C = -\Delta$  称为仪表的校正值。引入校正值  $C$  后，就可以利用上式对仪表的指示值进行校正，从而得到被测量的实际值  $A_0$ 。实际中，对准确度要求较高的仪表，一般都给出该表的校正值，以便在测量过程中校正被测量的指示值，从而提高测量准确度。

(2) 相对误差  $\gamma$  绝对误差  $\Delta$  与被测量实际值  $A_0$  比值的百分数，称为相对误差  $\gamma$ ，即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\%$$

一般情况下实际值  $A_0$  难以确定，而仪表的指示值  $A_x \approx A_0$ ，故

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

**例 1** 已知甲表测 200 V 电压时  $\Delta_1 = 2 \text{ V}$ ，乙表测 10 V 电压时  $\Delta_2 = 1 \text{ V}$ ，试比较两表的相对误差。

**解：**甲表相对误差为

$$\gamma_1 = \frac{\Delta_1}{A_0} \times 100\% = \frac{2}{200} \times 100\% = 1\%$$

乙表相对误差为

$$\gamma_2 = \frac{\Delta_2}{A_0} \times 100\% = \frac{1}{10} \times 100\% = 10\%$$

由上述结果可以看出，甲表的绝对误差  $\Delta_1$  是乙表绝对误差  $\Delta_2$  的两倍，但从绝对误差对测量结果的影响来看却正好相反。甲表的绝对误差只占被测量的 1%，而乙表的绝对误差却占被测量的 10%，换句话说，甲表的相对误差小，乙表的相对误差大。显然，在测量不同大小的被测量时，应使用相对误差  $\gamma$  来判断测量结果的准确程度。

(3) 引用误差  $\gamma_m$  相对误差可以表示测量结果的准确程度，但却不能说明仪表本身的准确程度。由  $\gamma = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\%$  可以看出，同一只仪表，在测量不同被测量时，由于摩擦等原因造成的绝对误差  $\Delta$  虽然变化不大，但被测量  $A_x$  却可以在仪表的整个刻度范围内变化。显然，对应于大小不同的被测量，就有不同的相对误差。因此，不能用相对误差来全面衡量一只仪表的准确程度。工程中，一般采用引用误差来反映仪表的准确程度。

绝对误差  $\Delta$  与仪表量程（最大读数） $A_m$  比值的百分数，称为引用误差  $\gamma_m$ ，即

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\%$$

由上式可以看出，引用误差实际上就是仪表在最大读数时的相对误差。因为绝对误差  $\Delta$  基本不变，仪表量程  $A_m$  也不变，故引用误差  $\gamma_m$  可用来表示一只仪表的准确程度。

## 二、测量误差的分类及消除方法

在测量过程中，由于受到测量仪表、测量方法、测试条件以及观测经验等多方面因素的影响，造成测量结果与被测量实际值存在差异，这种差异称为测量误差。根据产生测量误差的原因不同，测量误差可分为系统误差、偶然误差和疏失误差三大类。

### 1. 系统误差

指在相同条件下多次测量同一量时，误差的大小和符号均保持不变，而在条件改变时遵从一定规律变化的误差。

#### (1) 系统误差产生的原因

1) 测量仪表的误差。包括测量仪表本身不完善而造成的基本误差以及由于仪表工作条件改变而造成的附加误差。

2) 测量方法的误差。由于所用的测量方法不完善而引起的误差。例如，利用间接测量法时采用了近似公式，以及未考虑仪表内阻对测量结果的影响等。

(2) 系统误差的消除 根据产生系统误差的原因，采取相应的措施加以消除。消除系统误差的方法有：

1) 重新配置合适的仪表或对测量仪表进行校正，尽量满足仪表要求的工作条件。

2) 采用合理的测量方法。

3) 采用特殊的消除方法。

①正负误差补偿法：对同一量进行两次测量，使测量结果中的系统误差一次为正，一次为负，取其结果的平均值后，就能消除这种系统误差。例如，为消除外磁场对电流表读数的影响，可将电流表放置的位置调换  $180^\circ$  后再测量一次，则两种位置下测得的结果所产生的

误差必是一正一负，取其平均值后就能消除这种由外磁场影响而引起的系统误差。

②替代法：用可变的标准量去代替被测量，并使仪表的工作状态保持不变。于是，由已知标准量的数值便可求得被测量（两者相等）。这样，仪表本身的不完善和外界因素的影响对测量结果就不会发生作用，从而消除了系统误差。

③引入校正值：若已知仪表的校正曲线，则可将相应的校正值引入到测量结果中，即把测量值加上相应的校正值，从而消除系统误差。

## 2. 偶然误差

偶然误差是一种大小和符号都不固定的误差，又称为随机误差。

(1) 偶然误差产生的原因 主要由外界环境的偶发性变化引起。例如，外电场、磁场的突变，温度、湿度的变化，电源电压、频率的突变等，使得在重复测量同一量时，其结果不完全相同。

(2) 减少偶然误差的方法 一次测量结果的偶然误差没有规律，但多次测量中的偶然误差是服从统计规律的。这种规律之一是：随着测量次数的增多，绝对值相等、符号相反的偶然误差出现的次数相等。因此，通常采用增加重复测量次数的方法来消除偶然误差对测量结果的影响。测量次数愈多，其算术平均值就愈接近于实际值。

## 3. 疏失误差

疏失误差是一种严重歪曲测量结果的误差。

(1) 疏失误差产生的原因 主要由于操作者的粗心和疏忽造成，如测量中读数错误、记录错误、计算数据错误等。

(2) 防止疏失误差的方法 对含有疏失误差的测量结果应抛弃不用。消除疏失误差的根本方法是加强操作者的工作责任心，倡导认真负责的工作态度。

## 习题 1—3

1. 根据产生误差的原因不同，仪器仪表的误差分哪几类？
2. 误差的表示方法有哪几种？各适用于哪种场合？
3. 根据产生测量误差的原因不同，测量误差分哪几种？
4. 何谓系统误差？产生系统误差的原因有哪些？如何消除系统误差？
5. 何谓偶然误差？产生偶然误差的原因是什么？如何消除偶然误差？
6. 何谓疏失误差？产生疏失误差的原因是什么？如何消除疏失误差？

## § 1—4 测量数据的分析处理

所谓测量数据的分析处理，就是从测量所得到的原始数据中求出被测量的最佳估计值，并计算其准确程度。

### 一、有效数字的概念

在测量结束后，必须对测量结果的数据进行分析处理，以获得最准确的测量数据。在对测量数据进行处理时，不能认为一个数据中小数点后面保留的位数越多，测量结果越准确。

因为测量的结果都是近似值，这些近似值通常是用有效数字的形式表示的。所谓有效数字是指那些能够正确反映测量准确度的数字。

### 1. 有效数字的表示

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，而最后一位有效数字通常是在测量中估计读出的，也可以按规定取舍后得到的不可靠数字，称为欠准确数字。如用一只 100 V 的电压表（每小格为 1 V）测量电压时，指针指在 81 V 和 82 V 之间，可读取为 81.4 V，其中数字 81 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，称为欠准确数字，两者结合起来称为有效数字。对于数 81.4，有效数字是三位。

表示有效数字时要注意以下三点：

(1) 记录测量数值时，每一个数据只能有一位数字（最末一位）是估计读数，而其他数字都必须是准确读数。

(2) 数字 0 在数据中可以是有有效数字，也可以不是，这主要根据它是否表示准确程度来判断。一般地讲，数据左起第一位非零数字左边的 0 不是有效数字，而右边的 0 都是有效数字。这是因为第一位非零数字左边的 0 可以通过单位变换去掉，它不表示数据的准确度，只反映所使用单位的大小；而第一位非零数字右边的 0，特别是最末一位 0 表示了数据的大小和准确度，不能随意去掉。例如，0.053 10 MHz，它有 5，3，1 和 0 四位有效数字，而在其左边的两个 0 都不是有效数字，若把单位换为 kHz，则数据变为 53.10 kHz，左边两个 0 被去掉，仍然是四位有效数字，但不能把最末一位 0 去掉，因为它表示该数据准确到十万分之一兆赫兹（或百分之一千赫兹）。

(3) 为了明显地表示有效数字的位数，通常把数据用有效数字乘以 10 的幂次的形式表示。并且规定，10 的幂次前面的数字都是有效数字。例如， $8.20 \times 10^4$  V，表示它有三有效数字，而如果写成 82 000 V，则无法确定最后两个 0 是否都是有效数字。

### 2. 有效数字的取舍规则

在对测量数据进行运算之前，必须对测量值先进行取舍处理。如果有效数字的位数  $n$  已经确定，则多余的位数应一律舍去，取舍规则为：

(1) 若第  $n$  位数后面的数值大于 5，则第  $n$  位数加 1。例如，要求把 0.16 保留到小数点后一位数，结果应为 0.2。

(2) 若第  $n$  位数后面的数值小于 5，则第  $n$  位数后面的数全部舍去。例如，要求把 0.63 保留到小数点后一位数，结果为 0.6。

(3) 若第  $n$  位数后面的数值等于 5，应视前面（第  $n$  位）的数字而定：若第  $n$  位数为偶数，则舍去不进，即末位数不变；若第  $n$  位数为奇数，则舍 5 进 1，即末位数加 1。例如，把 0.250 和 0.350 保留到小数点后一位数，结果分别为 0.2 和 0.4。

上面的取舍规则可简单概括为：四舍六入五配偶。

**例 1** 对下列数据进行取舍处理，要求小数点后只保留 2 位。

1.985   3.854 6   1.995   4.545 2   16.372 0   32.455 0

**解：**因为题目要求小数点后面只保留 2 位，所以按照四舍六入五配偶的原则进行取舍。

1.985 → 1.98      (8 为偶数，后面的 5 应舍去不进)

3.854 6 → 3.85      (后面的 46 舍去)

- 1.995→2.00 (9 为奇数, 后面的 5 应进 1)
- 4.545 2→4.54 (4 为偶数, 后面的 52 应舍去不进)
- 16.372 0→16.37 (后面的 20 应舍去)
- 32.455 0→32.46 (5 为奇数, 后面的 5 应进 1)

如果所拟舍去的部分, 并非单独一个数字时, 不得对该数字进行连续的取舍, 要根据所要舍去的数字中最左边的第一个数字的大小, 按上述取舍规则进行取舍。

**例 2** 将 25.454 6 进行取舍处理, 要求保留整数。

不正确的做法: 25.454 6→25.455→25.46→25.5→26

正确的做法: 25.454 6→25

数据经过取舍后, 末位就是欠准确数字, 末位以前的数字是准确数字。由取舍规则可知, 取舍误差不大于末位单位的一半, 故此种规则称为“0.5 误差原则”。

### 3. 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。按照一定的规则进行计算, 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。常用运算规则如下:

(1) 加减法运算 首先对各个数字进行取舍, 使各数取舍到比小数点后位数最少的那项数字多保留一位小数, 然后再进行加减运算, 最后对运算结果进行取舍, 使其小数点后的位数与原各项数字中小数点后位数最少的项相同。

**例 3** 计算  $24.05 + 0.032 + 4.705 1$

**解:** 先对各项数据进行取舍。原式中, 数据 24.05 的小数点后有两位数字, 故其他数据的小数点后应保留三位数字。即 0.032 不变, 4.705 1 取舍为 4.705。

然后进行运算:

$$\text{原式} = 24.05 + 0.032 + 4.705 = 28.787$$

最后将结果 28.787 取舍为 28.79。

(2) 乘除运算 先对各项数字进行取舍, 使各数字取舍到比有效数字位数最少的那项数字多保留一位有效数字, 然后进行乘除运算, 最后对运算结果进行取舍, 使其有效数字的位数与原有效数字位数最少的那个数相同。

**例 4** 计算  $1.057 82 \times 14.21 \times 4.52$

**解:** 原式中, 数据 4.52 的有效数字的位数最少, 故将 1.057 82 取舍为 1.058, 14.21 不变。

$$\text{原式} = 1.058 \times 14.21 \times 4.52 = 67.954 493$$

最后将结果 67.954 493 取舍为 68.0。

(3) 乘方及开方运算 按照正常的乘方及开方进行运算, 运算结果比原数多保留一位有效数字即可。

**例 5** 计算  $(25.6)^2$

**解:**  $(25.6)^2 = 655.36$

由于原数 25.6 只有三位有效数字, 故运算结果比原数多保留一位有效数字, 即结果应等于 655.4。

## 二、测量数据的分析处理

数据处理的任务就是对测量所获得的一系列数据进行深入的分析, 以便得到各被测量之

间的关系，有时还需要用到数学分析的方法，推导出各被测量之间的函数关系。通过数据处理可以确定并表示出输入量与输出量之间的关系，从而揭示出事物的本质及事物之间的内在联系。

### 1. 测量数据的表示方法

处理测量数据通常采用的表示方法有表格法、图示法和经验公式法。

(1) 表格法 在自然科学的实验和工程技术中，经常需要把一系列测量数据列成表格，再进行其他的处理。表格法虽然简单方便，但不适宜进行深入的分析，因为表格不能给出所有的函数关系，而且从表格中也不容易看出自变量变化时函数的变化规律，只能大致估计出函数的递增、递减或周期性变化趋势。表格法清晰地表示了被测量与测量结果的关系，方便以后的计算，同时它也是图示法和经验公式法的基础。

(2) 图示法 图示法就是把测量结果中的有关量的关系用图形的方式表示出来。它的最大优点是形象，从图形中可以很直观地看出函数的变化规律，如递增或递减、最大值和最小值及是否有周期性变化规律等。但是，图形只能得出函数的变化关系或变化趋势，而不能进行数学分析。

作图时通常采用直角坐标系，具体方法一般是先按成对数据  $(x, y)$  描点，再连成曲线。但要注意使连出的曲线光滑匀整，并尽量使曲线与所有各点接近，不强求通过各点，要使位于曲线两边的点数尽量相等。曲线是否能反映出函数关系，在很大程度上还取决于图形比例尺的选取，即决定于坐标的分度是否适当。坐标比例尺的选取没有严格的规定，要具体问题具体分析。

(3) 经验公式法 在科学实验和工程技术中经常用与图形对应的公式来表示所有的测量数据，并把与曲线对应的公式称为经验公式。

把全部测量数据用一个公式来代替，不仅简明扼要，而且可以对公式进行必要的数学运算，便于研究各自变量与函数之间的关系。经验公式法是科学实验中最常使用的一种方法，有时把这种公式又称为数学模型。

### 2. 测量数据的分析处理

在测量过程中，若影响测量误差的各种因素并不改变，如在相同的环境条件下，由同一测量人员在同一台仪器上、采用同样的测量方法、对同一被测量作多次测量，这种测量称为等精密度测量。等精密度测量所得到的一组数据中，可能同时包含系统误差、随机误差和疏失误差，为得到合理的测量结果，必须对所测量数据进行分析处理。下面简单介绍在假设系统误差已经消除的情况下等精密度测量数据的处理步骤。

(1) 正确表示数据 按照实际情况需要，将测量的数据正确地表示出来，如用列表法将测量数据按测量先后顺序列于表中。

(2) 求出算术平均值 根据统计学知识，测量的结果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，测量结果越准确。设每次测量结果为  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ )， $n$  为测量次数，则测量结果的平均值为

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

(3) 计算每次测量的绝对误差 把任意一次测量值  $x_i$  与测量结果的平均值  $\bar{x}$  相减就得出每次测量的绝对误差（或称为剩余误差）。即

$$\Delta_i = x_i - \bar{x}$$

(4) 计算均方根误差 在对每一组绝对误差进行分析时,可排除或减小由系统误差带来的影响。在此基础上这组测量结果的误差按均方根误差计算最为合理,其表达式为

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}}$$

(5) 判断是否存在疏失误差 将均方根误差与各个绝对误差进行比较,去除超过均方根误差 3 倍的测量值(这些项可被视为疏失误差),再重新计算平均值和均方根误差,直到不存在疏失误差(即各项绝对误差都小于  $3\delta$ ) 为止。

(6) 给出测量结果的报告值 测量结果的报告值由两部分组成,即由测量结果和测量误差组成,其表达式为

$$x = \bar{x} \pm \delta = \frac{\sum x_i}{n} \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}}$$

上式中的第一项表示测量结果,第二项表示测量误差。

在计算过程中,为避免累加误差,可保留 2 位欠准确数字,但是最后的测量结果应按照有效数字的规定处理,即只保留一位欠准确数字。

**例 6** 对某电压进行 10 次等精密度测量,利用修正值对测量值进行修正后,具体数值如下: 210.4, 209.8, 209.7, 209.6, 210.3, 210.0, 209.9, 210.2, 209.9, 210.1 (电压单位为 V), 要求对测量数据进行处理,求取算术平均值、每次测量的绝对误差并判断疏失误差。

**解:**

(1) 由测量值  $U_{xi}$  求算术平均值  $\bar{U}$ , 将计算结果填入表 1—1 中。

(2) 计算每次测量的绝对误差  $\Delta_i$ , 将计算结果填入表 1—1 中。

(3) 判断疏失误差。全部数据的绝对误差都小于  $3\delta$ , 表明测量值都为合格数据, 无疏失误差。

(4) 测量结果的报告值为  $x = \bar{x} \pm \delta = \frac{\sum x_i}{n} \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}} = (210.0 \pm 0.2)V$ 。

表 1—1

测量数据

$n$	$U_{xi}/V$	$\Delta_i/V$	$n$	$U_{xi}/V$	$\Delta_i/V$
1	210.4	0.4	6	210.0	0
2	209.8	-0.2	7	209.9	-0.1
3	209.7	-0.3	8	210.2	0.2
4	209.6	-0.4	9	209.9	-0.1
5	210.3	0.3	10	210.1	0.1

算术平均值为  $\bar{U} = 210.0 V$

### 习题 1—4

1. 何谓有效数字? 它由几部分组成?
2. 有效数字的取舍规则是什么?



3. 处理测量数据通常采用的表示方法有哪几种?

4. 如何进行测量结果的数据处理?

5. 对下列数据进行取舍处理, 要求小数点后只保留 2 位。

523.745      89.925 1      3.226 81      61.995

76.528      54.956      54.235      65.254

6. 进行下列有效数字的运算。

$$154.05 + 45.235 + 1.275 =$$

$$14.23 \times 1.456 \times 0.655 =$$

7. 测量某电动机线圈的直流电阻, 9 次测量的数据如下。试写出测量结果和测量误差的表达式。

$$x_1 = 13.644 \Omega \quad x_2 = 13.652 \Omega \quad x_3 = 13.648 \Omega$$

$$x_4 = 13.647 \Omega \quad x_5 = 13.650 \Omega \quad x_6 = 13.655 \Omega$$

$$x_7 = 13.649 \Omega \quad x_8 = 13.654 \Omega \quad x_9 = 13.648 \Omega$$