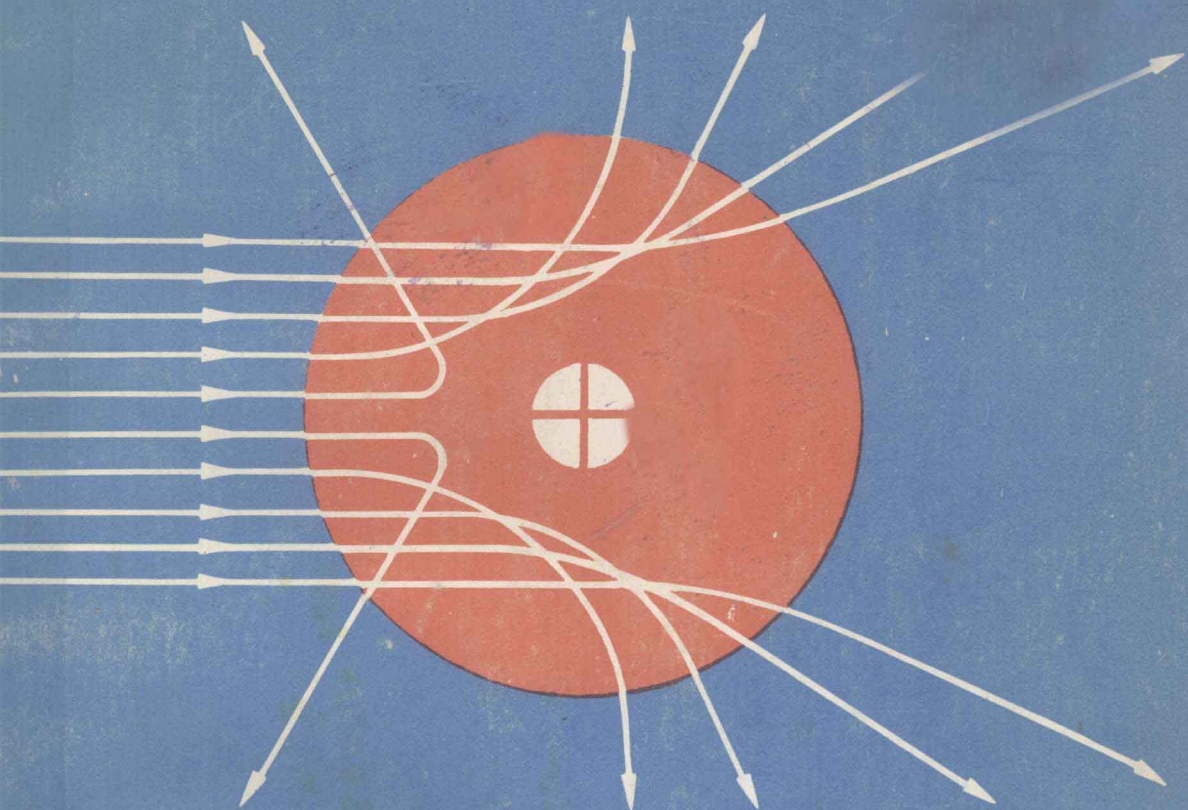


高校教材



李明怀 张本良 熊清香 编著

物理实验与数据处理

武汉测绘科技大学出版社

物理实验与数据处理

李明怀 张本良 熊清香 编著

武汉测绘科技大学出版社

物理实验与数据处理

李明怀 张本良 熊清香 编著

责任编辑 郭毅

*

武汉测绘科技大学出版社出版发行

湖北省京山县印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：12 字数：300千字

1990年12月第一版 1990年12月第一次印刷

印数：0 001—5 000

ISBN 7-81030-056-3/O·8 定价：4.00元



前 言

本教材是根据1986年全国工科院校物理实验课程指导小组制订的教学要求,并总结历次物理实验改革的经验所编写的。为顾及函授、职大等成人教育的具体情况,本书还编写了一些基本、易行的实验项目。因而,本书不仅可供工科院校各专业作为物理实验课程的教材,亦可作为电大、职大及函授等理工类的物理实验教材。

本书共有七章,第一、二、三章属在物理实验中所应掌握的基础知识,它们包括误差理论、有效数字的概念及其运算、实验观测数据的常用处理方法等。由于数据处理和实验误差分析是贯穿于每个物理实验中,用以培养学生实验能力的一个重要方面,因此,我们将这一部分的内容集中编写。其目的在于,使学生能正确地理解并掌握一些基本概念,以便在实验课的教学中得到正确运用。

第四、五、六、七章分别为力学、热学、电磁学、光学、近代物理及综合性实验。其中,有的实验并列介绍了两种实验装置和相应的实验内容,以便根据具体设备条件进行选择。考虑到物理实验已单独设课的具体情况,在选定、编写实验项目及内容时,力求做到由浅入深、循序渐进,其所涉及的范围旨在逐步培养学生的实验技能和掌握基本的物理实验方法。

物理实验最能体现出集体劳动的特色,无论是教材的编写还是实验内容的充实、完善,无不包括任课教师和实验室工作人员的辛勤劳动,本书就是在这种劳动的基础上完成的。本书的第一、二、三章由李明怀副教授编写,第四章由熊清香编写,第五章由张本良编写,第六章由张本良、熊清香编写。王德新、吴云龙、李道银参加了第七章部分实验内容的编写工作。全书由李明怀、张本良统稿。

本书的出版得到武汉测绘科技大学出版社的关心和支持,借此表示衷心感谢。由于编者水平所限,加之时间仓促,书中难免有粗疏及谬误之处,恳请批评指正。

编 者

1990年8月于武汉工学院

绪 论

“我就是要做实验。我认为，科学上的进步，总是先由实验做出来……”

“三十年过去了，我终于回到了我时时思念的实验室——那用科学的乳汁哺育我的母亲，……”。

——钱三强*

一、物理实验课的地位和作用

物理学是一门建立在实验基础上的科学。物理概念的建立、物理规律的发现、物理理论的形成，都必须以严格的科学实验为基础，并为以后的科学实验所验证。

为了适应四个现代化的需要，在培养高等工程技术应用人才的大学里，不但要加强专业基础理论；而且要加强实践能力的培养。由于物理实验是学生入学后接受系统实验训练的开端；又是专业实验和科学实验的重要基础。因此，物理实验课对培养学生的实践能力起着十分重要的作用。

作为一门独立的物理实验课，它的教学目的是：

1. 通过实验教学，使学生了解物理实验的基本思想；掌握常用物理量的基本测量方法及减小测量误差的方法。
2. 掌握常用仪器的调整和使用的基本技能。
3. 培养学生科学实验能力和提高学生科学实验的素质。要求学生具有看懂实验资料、正确使用仪器、处理数据、分析实验结果、撰写实验报告等能力；并且有对待科学实验一丝不苟的严谨态度及实事求是的工作作风。

二、物理实验课的基本程序

1. 实验前的预习

学生进入实验室前必须进行预习。预习时应仔细阅读实验教材、着重理解实验原理、明确实验的大体步骤。实验前写好预习报告。预习报告包括以下内容：

(1) 实验目的。

(2) 实验原理（扼要简述）。

列出主要公式，电学实验画出电路图，光学实验画出光路图。

(3) 实验表格（根据测量项目的特点，设计合理的表格，力求简明）。

* 郭奕玲编《伟大的发现——钱三强的回忆》，北京科学技术出版社，1989年10月版，P10

(4) 实验步骤(扼要归纳)。

2. 课堂实验

做实验时,应根据实验步骤和要求,认真调试仪器,仔细观察和测量有关物理量,并如实地记录测量数据。多人合做实验时,尽可能多做一两次,各司其职,互相配合。

实验完毕,应将测量数据记录交给教师审阅,经教师认可签字后,整理好仪器方可离开实验室。未经重新测试,不允许修改实验数据。

3. 完成实验报告

撰写实验报告是对实验全过程进行总结和深入理解的一个重要步骤。实验报告应独立完成,除上述预习报告的四部分内容外,还有:

(1) 实验仪器。记录实验所使用的主要仪器及其规格、型号和编号。

(2) 实验内容。列出测量项目及数据。

(3) 数据处理。将测量数据,按一定函数关系式求出结果,并根据各实验的具体要求,计算误差,写出测量结果表达式。

(4) 讨论。可对实验结果、实验方法进行评论,抒发心得体会,对实验误差进行分析。

(5) 思考题。

书写实验报告时,要求学生努力做到字迹端正、文句通顺、数据记录整洁、图表合格、内容简明扼要。

目 录

绪 论

第一章 测量与误差	(1)
§ 1 物理实验中的测量与分类	(1)
§ 2 误差的概念及其表示	(2)
§ 3 测量误差的分类	(6)
§ 4 观测数据的有效数字	(7)
第二章 随机误差	(13)
§ 1 随机误差的正态分布及特性	(13)
§ 2 物理量真值的最佳表示——算术平均值	(16)
§ 3 各种随机误差的表示及估算	(17)
§ 4 观测结果的表示	(23)
§ 5 间接测量随机误差的计算	(25)
第三章 物理实验中常用的数据处理方法	(31)
§ 1 列表法	(31)
§ 2 分组逐差法	(32)
§ 3 观测结果的图解处理	(34)
§ 4 曲线的拟合	(36)
第四章 力学、热学实验	(41)
实验 1 长度测量	(41)
实验 2 物体密度的测量	(47)
实验 2-1 流体静力法测固体密度	(48)
实验 2-2 比重瓶法测液体密度	(50)
实验 3 重力加速度的测定	(52)
实验 3-1 自由落体法测重力加速度(光电计时)	(53)
实验 3-2 单摆法测重力加速度	(58)
实验 4 金属杨氏模量的测定	(61)
实验 5 液体粘滞系数的测定	(67)
实验 6 转动惯量的测定	(71)

实验7	液体表面张力系数的测定	(75)
实验8	简谐振动参数的测定	(75)
实验9	物体比热的测定	(82)
实验9-1	混合法测定固体比热	(82)
实验9-2	用图解外推法修正散热损失	(83)
实验10	测定冰的溶解热	(85)
第五章 电磁学实验		(89)
实验11	测线性与非线性电阻及其伏安特性	(89)
实验12	电表的改装与校正	(96)
实验13	用惠斯登电桥测电阻	(99)
实验14	卡尔文电桥测低电阻	(103)
实验15	非平衡电桥	(106)
实验16	电位差计的使用	(108)
实验17	温差电偶的校准	(112)
实验18	用冲击电流计测电容和高电阻	(117)
实验19	示波器的使用	(119)
实验20	用稳恒电流场模拟静电场	(127)
实验21	用示波器测铁磁材料的磁滞回线	(131)
实验22	感应法测圆电流磁场	(135)
第六章 光学实验		(139)
实验23	薄透镜焦距的测定	(139)
实验24	等厚干涉现象的观测	(144)
实验25	分光计的调节与三棱镜顶角的测量	(147)
实验26	衍射光栅	(155)
第七章 近代物理与综合性实验		(158)
实验27	声速的测定	(158)
实验28	迈克尔逊干涉仪的调节和使用	(162)
实验29	用霍尔效应测磁场	(165)
实验30	全息照相	(169)
实验31	用光电效应法测定普朗克常数	(174)
实验32	里德堡常数的测定	(177)

第一章 测量与误差

§1 物理实验中的测量与分类

物理学是一门以实验为基础的科学。一切科学实验，包括物理实验都离不开测量。所谓测量，就是借助有关实验设备通过物理实验的方法，将被测量与作为标准的同类单位量进行比较的过程。

对于不同的物理实验，由于获得最终测量结果的方式各不相同，因而测量又可分为三大类：直接测量、间接测量和组合测量。

一、直接测量

直接测量就是用一个标准的单位物理量或预先经过标定好的仪器去直接量度未知物理量的大小，其所获得的实验数据就是最终的测量结果。这种方法也就是物理实验中运用最多的“比较法”。直接测量是实现物理量测量的基础，广泛应用于工程技术测量中。物理量中可以直接测量的量很多，例如，用米尺或游标卡尺测量长度，用电表测量电流，用温度计测量温度，用计时器测量时间等。直接测量可表示为

$$y = x$$

式中 y 为待测的未知量， x 为实验中直接测得的量。

二、间接测量

在物理实验、科学研究以及工程技术领域中，有相当多的量是无法用仪器或实验装置直接测量出来的，如物质的热容量，电阻的电阻系数，机组的效率等。这些物理量必须先直接测量几个与它有一定关系的数据，然后通过一定的函数关系来计算出所要求得的物理量。这种测量称为间接测量。众所周知，金属导体的电阻 R 与它的长度 L 、截面积 S 之间有如下关系

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

可见，要测量某种导体的电阻系数 ρ ，必须先直接测量该导体一段的长度 L ，截面积 S 及相应的电阻 R ，然后通过下式来计算出电阻系数

$$\rho = R \frac{S}{L}$$

间接测量可用如下通用的函数关系式表示

$$y = f(x_1, x_2, \dots)$$

式中， y 为间接测量的待测物理量， $x_1, x_2, \dots$ 为直接测量的物理量。

三、组合测量

有些物理量是将直接测量或间接测量的数据，代入确定的联立方程组或通过多重测量计算的方法来确定的，这种方法就称为组合测量法。电阻温度系数的确定就是此种测量方法的一个典型实例。标准电阻线圈的电阻与温度之间有下列关系

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t-20) + \beta(t-20)^2] \\ \approx R_{20} + R(t-20)\alpha + R(t-20)^2\beta$$

式中， R_t ——电阻在 $t^\circ\text{C}$ 时的实际阻值；

R_{20} ——电阻在 20°C 时的实际阻值；

R ——标准电阻的标称值（或名义值）；

α 、 β ——温度系数。

显然，为了确定 α 、 β 和 R_{20} ，至少要测出在三种温度 t_1 、 t_2 和 t_3 状态下的相应电阻值 R_{t_1} 、 R_{t_2} 和 R_{t_3} ，再通过下述方程组

$$R_{t_1} = R_{20} + R(t_1-20)\alpha + R(t_1-20)^2\beta \\ R_{t_2} = R_{20} + R(t_2-20)\alpha + R(t_2-20)^2\beta \\ R_{t_3} = R_{20} + R(t_3-20)\alpha + R(t_3-20)^2\beta$$

方可确定 α 、 β 和 R_{20} 的值。

组合测量多用于精密计量和科学实验中。

§2 误差的概念及其表示

在进行科学实验的观测中，我们会发现任何实验均具有一定的局限性。由于实验方法和所采用的实验设备、仪器都不可能绝对完善，要想得到任何绝对不受畸变的测量结果是不可能的。不仅如此，出于实验者知识与经验的限制，对实验条件无法严格控制，对实验设备、仪器缺乏严格正确的操作，加之实验中的疏忽或记录中的错误等等因素，也会导致测量结果的歪曲。以上种种原因使测量结果的畸变最终表现为：测量结果与待测参数的真（正）值之间存在着一定的整值，此差值就称为测量误差。实践表明：误差存在于一切科学实验的观测中，而误差的存在，使观测值并不等于实际真值。

为了定量研究误差，按误差的表示方法，可将其分成绝对误差与相对误差，下面对这两种误差分别进行研究。

一、绝对误差

若待测量的真值为 μ ，实验中的观测值为 x ，则测量误差 Δ_x 定义为

$$\Delta_x = x - \mu \quad (1-1)$$

这里， Δ_x 表示了测量值与待测参数真值的偏离程度，由于式（1-1）以代数差的形式给出了误差绝对值的大小及其符号，故通常称为绝对误差。式中的真值 μ 是指：在规定的时

间、空间或状态下，被测参数 x 客观存在的实际值。真值有以下几种

理想真值 例如理想电容和电感，其两端电压与所通过电流的相位差角为 $\pi/2$ 。

约定真值 例如时间单位——秒, 规定为铯133原子基态的两个超精细能级之间跃迁辐射周期的9192631770倍的持续时间。凡类似于上述条件复现出的量值, 称为约定真值。

相对真值 在测试仪表(或系统)的实际检定工作中, 为了确定被检测仪表(或系统)的误差, 通常将被检对象与它的标准进行对比, 这时如果标准的误差可按一定条件予以忽略, 则由标准所确定的值, 即可作为被检对象的相对真值, 也就是被测量的实际值, 为区别起见此值用 μ' 表示。

例 1-1 检定某电流表, 若被检表的指示值为10.0安, 标准表对应此示值的读数为10.1安, 则被检表在示值10.0安处的绝对误差为

$$\Delta I = x - \mu' = 10.0 - 10.1 = -0.1 (\text{A})$$

由此例可知, 绝对误差为一代数量且为名数, 并以被测量的单位表示。

二、修正值

在实际测量中, 除绝对误差外还会经常用到修正值 C_x , 它与绝对误差等值反号, 即

$$C_x = -\Delta_x = \mu - x \quad (1-2)$$

由此可知, 例 1-1 中电流表在示值10.0安处的修正值为 $C_I = 0.1 (\text{A})$ 。

通过检定, 可以由上一级标准(或基准)量具给出被检仪器的修正值。一旦获得修正值, 利用式(1-2)的关系便可以求得被检测仪器、仪表所指示的实际值

$$\mu' = x + C_x \quad (1-3)$$

例 1-2 用某电压表去测量电压, 如果电压表的指示值为9.8伏, 该指示值的修正量为-0.1伏, 则被测电压的实际值为

$$\mu'_U = U + C_U = 9.8 - 0.1 = 9.7 (\text{V})$$

由此可见, 当引入修正值后, 可以消除测试仪表所引起的误差, 从而保证了量值的准确传递。

根据各种不同测试仪器、仪表的特点, 修正值可以用曲线、表格或公式等形式给出。在某些自动测量仪器、仪表中, 可以将其指示值的修正量预先贮存起来, 并在测量过程中进行自动修正。

三、相对误差

绝对误差虽然能够反映观测值与待测参数真值的偏差程度, 但还不能反映出测量的准确程度。例如, 对两直流电路中的电流分别进行测量, 其观测值与绝对误差分别为: $I_1 = 10$ 安、 $\Delta I_1 = 1$ 毫安; $I_2 = 10$ 毫安、 $\Delta I_2 = 0.1$ 毫安。在测量结果中, 虽然 $\Delta I_1 > \Delta I_2$, 但这绝不能说明所观测的 I_2 较 I_1 要准确。因为前者是测量10安时偏差了1毫安; 而后者则是在观测10毫安时偏差了0.1毫安; 两次测量的误差在各自观测量中所占的比重各不相同。为了便于比较不同大小待测参数测量过程中的准确程度, 又提出了相对误差的概念。

绝对误差 Δ_x 与某约定值 T 之比称为相对误差, 相对误差一般用百分数表示。根据定义, 相对误差 E 可用下式表示

$$E = \frac{\Delta_x}{T} \times 100\% \quad (1-4)$$

在相对误差的表达式中,分子均为绝对误差,不同相对误差的区别主要在于分母 T ,根据分母所采用的不同约定量,则有不同的相对误差。常用的相对误差有:实际相对误差,示值相对误差,满度相对误差。

1. 实际相对误差

实际相对误差,是用测量的绝对误差 Δ_x 与被测量的实际值 μ' 的百分比值来表示的。即

$$E_{\mu'} = \frac{\Delta_x}{\mu'} \times 100\% \quad (1-5)$$

实际相对误差多用于理论分析或精密测量中。

2. 示值相对误差

示值相对误差,是用测量中的绝对误差 Δ_x 与仪器、仪表的(指)示值 x 的百分比值来表示的。即

$$E_x = \frac{\Delta_x}{x} \times 100\% \quad (1-6)$$

此种相对误差多用于工程测量和仪表的检定工作中。

例1-2 对于文中两个测得的电流而言,所测得的 I_1 与 I_2 的示值相对误差分别为

$$E_{I_1} = \frac{\Delta_{I_1}}{I_1} \times 100\% = \frac{1 \times 10^{-3}}{10} \times 100\% = 0.01\%$$

$$E_{I_2} = \frac{\Delta_{I_2}}{I_2} \times 100\% = \frac{0.1 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-3}} \times 100\% = 1\%$$

可见,虽然 $\Delta_{I_1} > \Delta_{I_2}$,但所测得的 I_1 要比 I_2 来得准确。

3. 满度相对误差

满度相对误差又简称为满度误差,是用测量的绝对误差 Δ_x 与测量仪器、仪表的满刻度值 x_m 的百分比来表示的。即

$$E_m = \frac{\Delta_x}{x_m} \times 100\% \quad (1-7)$$

由于 E_m 是用绝对误差 Δ_x 与一个常数量 x_m (仪器、仪表量程的上限)之比值来表示的,故 E_m 实际上给出的是绝对误差的大小。电工、热工仪表都是按满度相对误差 E_m 的大小来进行分级的。例如,1.5级的电表就表明 $E_m \leq \pm 1.5\%$ 。显然,各量程的绝对误差一般是不相同的。对于准确度级别在0.2级以下的磁电式电表,一般来说当表头偏转到不同位置时,因磁场分布、机械摩擦、游丝扭矩等诸因素的不均匀皆可忽略不计,故在一个量程范围内可以认为 Δ_x 是一个常数。对于0.2级以上的电表,上述诸因素的不均匀性便较为突出, Δ_x 将不是常数。

按国家标准,我国的电工仪表共分七级:0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5及5.0。电表的级别均在电表面板上以 $\textcircled{1.0}$ 的形式标出。常用电工仪表的准确度等级与允许误差的关系列于表1-1中。

表1-1 常用电工仪表的准确度等级

准确度等级	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5
允许误差占最大测量值的百分数	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5

例 1-4 用最大量程为5.0安, 准确度级别为0.5级的电流表, 分别测量两个电流, 其值为 $I_1=5.0$ 安、 $I_2=2.5$ 安。试求测量 I_1 和 I_2 的相对误差各为多少?

因
$$E_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% = 0.5\%$$

故
$$E_{x1} = \frac{\Delta x}{x_1} \times 100\% = \frac{x_m}{x_1} E_m = \frac{5.0}{5.0} \times 0.5\% = 0.5\%$$

$$E_{x2} = \frac{\Delta x}{x_2} \times 100\% = \frac{x_m}{x_2} E_m = \frac{5}{2.5} \times 0.5\% = 1.0\%$$

可见, 当仪表的准确度级别选定后, 待测参数越接近所选仪表的上限, 则测量误差的绝对值越小。为了减少测量中的示值误差, 在选择测量仪器、仪表的量程时, 应使指针尽可能接近仪表的满刻度值。一般情况下, 应使仪器、仪表工作在不小于满刻度值 $2/3$ 以上的区域。

例 1-5 某电路中的待测电压为95.0伏, 现有0.5级、最大量程为300.0伏和1.0级、最大量程为100.0伏的电压表各一只, 试问选用哪种电压表进行测量为佳?

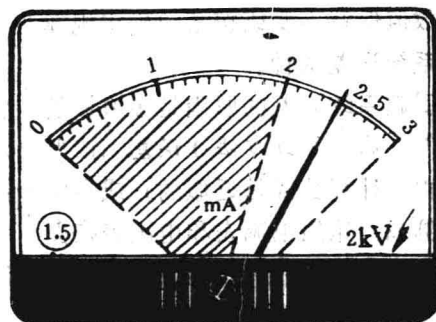


图 1-1 示值误差较小的指针偏转范围

根据电表精度级别的定义, 用第一只表和第二只表进行测量时的满度相对误差分别为

$$E_{m1} = \frac{\Delta u_1}{u_{m1}} \times 100\% = 0.5\%$$

$$E_{m2} = \frac{\Delta u_2}{u_{m2}} \times 100\% = 1.0\%$$

两只电表在测量待测电压时的示值相对误差为

$$\begin{aligned} E_{u1} &= \frac{\Delta u_1}{u_1} \times 100\% = \frac{u_{m1}}{u_1} \cdot \frac{\Delta u_1}{u_{m1}} \times 100\% \\ &= \frac{300.0}{95.0} \times 0.5\% = 1.6\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{u2} &= \frac{\Delta u_2}{u_1} \times 100\% = \frac{u_{m2}}{u_2} \cdot \frac{\Delta u_2}{u_{m2}} \times 100\% \\ &= \frac{100.0}{95.0} \times 1.0\% = 1.1\% \end{aligned}$$

由此例可知, 如果测试仪器的最大量程选择得当, 用1.0级的仪表进行测量反而要比用0.5级的仪表来得准确。因而, 在选用测试仪表时, 那种单纯追求仪表准确度“越高越好”的倾向是片面的, 有时也是错误的。在实际选定测试仪表时, 应根据被测量的大小, 并兼顾测试仪器的准确度级别和测量上限进行合理选择。如采用标准表对其它同类下级仪表进行指示检定时, 标准表的最大量程和被校仪表的最大量程应尽可能相等。

§ 3 测量误差的分类

按照误差的出现规律性及其对测量结果影响的特点，测量误差可以分为系统误差、随机误差（亦称偶然误差）和过失误差（亦称粗差）。

一、系统误差

系统误差是指在同一条件下（测量方法、环境和观测人员不变）多次测量同一量时，符号和数值保持不变或按某一确定规律变化的误差。因此，系统误差又可分为恒定系统误差和变值系统误差两种。

引起系统误差的原因是多方面的，它主要有以下几种：

1. 原理（或方法）误差 该误差是由测量原理和测量方法上的不完善所造成的。另外，由于计算公式是近似的，或在实验设计中忽略了一些因素的影响，亦均可能导致系统误差。例如，采用电流表和电压表按图 1-2 所示的电路来间接测量电阻时，忽略了电流表内阻对测试电路的影响，由此所产生的误差则属于系统误差。

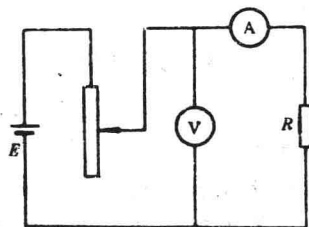


图 1-2 伏安法测电阻电路

2. 仪器误差 该误差是由测试仪表或设备的不完善所产生的。例如，等臂天平的两臂不可能绝对相等，且难于调整到理想位置；不垂直、不水平及偏心等；标准计量器具随时间的不稳定；尺寸随时间的微小改变，电阻老化等。类似以上因素所导致的误差均属仪器误差。

3. 环境误差 它是由环境条件变化所引起的误差。如，环境温度、湿度、气压的变化以及光照、周围电磁场的影响等，均会对测量结果产生影响，由此而产生的误差则属环境误差。

4. 人员误差 该误差是由于观测人员的感觉器官或生理特点所引起的。如实验时记录信号或计时常超前或迟后；在观测实验目标时始终偏左或偏右；估计读数时总偏大或偏小等。

系统误差决定了测量的准确度。系统误差越小，测量结果越准确，其偏离被测量实际值的程度越小。

系统误差的出现一般都有较明确的原因，并可采取适当的措施使之对实验结果的影响降低到最小程度。如，可在实验前对测试设备、仪表进行校正；或对实验方法采取补偿措施，以修正或消除系统误差的影响。至于人员误差，则需要实验者在长期的实验过程中逐渐积累经验，提高实验素质来降低其影响。

二、随机（偶然）误差

在多次重复测量时，由于偶然因素的影响，测量误差的大小和符号随机出现，缺乏一定的规律性，其平均值随观测次数的增加而逐渐趋近于零，具有此种特性的测量误差称为随机误差或偶然误差。

随机误差包括了所有测量人员器官、生理特点及技术不熟练、外界条件的变动、测量仪

器构造的不完善, 测量对象本身状态的变化等一系列偶然因素所导致的误差。

对同一物理量进行多次重复测量时, 随机误差可大可小、可正可负。就其个体而言是无规律、不可预测、不可控制的。但就其总体来说(大量个体的总和)则服从于一定的统计规律, 可以从理论上计算它对测量结果的影响。因此, 统计方法是分析、研究随机误差的基础。

随机误差决定了测量结果的精密度, 它越小测量结果的精密度就越高。

三、粗差(过失误差)

在测量结果中由于观测者的疏漏, 使测量结果明显被歪曲, 由此而产生的误差称为粗差。凡含有粗差的测量值称为坏值或异常值。读错、记错、测错或者实验条件尚未达到要求就开始测量, 这些均会造成粗差。

在实验所观测的数据中, 我们往往会发现某一个数据或几个测量数据特别可疑, 较正常数据而言起伏较大。这种起伏究竟是随机起伏的正常现象呢? 还是由于测量中出现粗差所致? 这就需要测量人员作出尽可能正确的回答。因为对这样的数据如果处理不当, 不仅会严重歪曲测量结果, 有时还可能漏掉极为“意外”的信息。例如, 对电学实验而言, 异常误差的出现, 可能预示着电路中某处接触不良、某个元件将损坏、仪器工作不稳定等; 甚至有时还可能预示着新的物理现象将被发现。因此, 对可疑测量值不应该为了追求数据的一致性而轻易丢去, 而要正确慎重处理。

就实验观测中的系统误差、随机误差、粗差而言, 由于系统误差可以采取一定的措施来予以消除或修正, 而粗差又有确定的统计法则来予以判别并剔除。所以, 在以下的章节中, 主要研究随机误差的分布规律及其估算方法。此时, 已认为实验观测数据中的系统误差已予补偿或消除, 坏值也被剔除。

§ 4 观测数据的有效数字

如前所述, 任何一个物理量的观测结果总是或多或少地存在着误差, 因而观测值只能是近似的。观测结果的这种近似性理应在观测数据中得到反应, 从这种意义上讲, 观测数据应该与数学上的“数”有着概念上的差别。

一、关于有效数字的概念

在实验过程中所使用的测量仪器一般都配有供读取数据的标尺, 并注有标尺上各刻度所代表的物理量数值。在观测数据时, 待测量不一定正好落在标尺分度的刻线上, 而是介于某两相邻刻线之间。因此, 除记下分度的整数部分外, 一般还要合理地估读一位。例如, 图 1-3 中用刻有厘米的米尺来量度某一物体长度, 所测物体的长度大于 4 cm 而小于 5 cm;

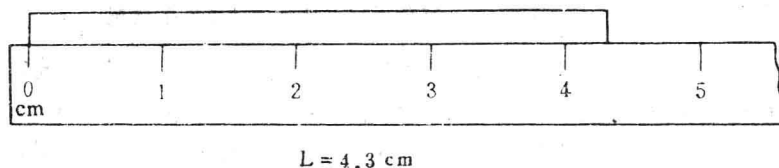
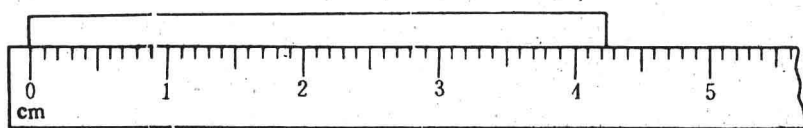


图1-3 用刻有厘米刻度的米尺测长

即使米尺上没有毫米的刻度,但可由目测估计到毫米(即最小刻度厘米的 $1/10$),所以该长度的观测值可读为 4.3cm 。对于不同的观测者,最后一位估读的结果可能稍有差异,而使观测结果为 4.2cm 或其它值。但这些可能出现的读数都有一个共同的特点:前面的“4”是根据量具刻度线直接读出,是准确无误的,将其称为可靠数字;而可能出现的读数中的最后一位数字,都是依目力估计出来的读数,并不十分准确,将它称为可疑数字。对于可靠数字,根据待测量的大小可以有多位,而可疑数字仅有一位。观测数据中的可靠数字与最后一位的可疑数字,统称为观测数据的有效数字,图1-3中的测量结果为2位有效数字。

对于图1-3中的同一待测量,若改用最小刻度为毫米的量具进行测量(如图1-4所示),则可准确读出 4.2cm ,再估计到毫米刻度的 $1/10$,则可读为 4.26cm 。由于最后一位估计的可疑数字可能会因目测的差异而观测为 4.25cm 或 4.27cm ;但是,其观测结果由三位有效数字组成是肯定的,且数据中的4.2是准确无误的,其差别仅在第三位的可疑数字上



$$L = 4.25\text{cm}$$

图1-4 用刻有毫米刻度的米尺测长

由上述有效数字概念的提出可知:对同一观测而言,观测数据有效数字位数的多少,取决于测量仪器精度的高低,它的位数不能随意增减。

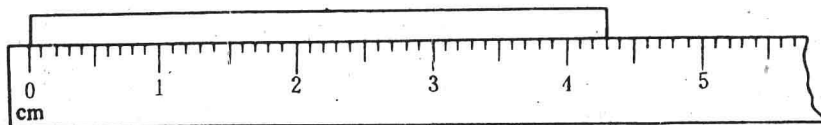
对于观测结果的有效数字,应特别注意下述几个问题。

1. 有效数字的位数与小数点位置无关

由于观测数据的有效数字位数主要取决于量具或仪表,一旦测试仪表选定后,观测数据的有效数字位数就确定了。当对观测数据进行单位换算时,小数点位置的变更不影响有效数字位数。例如, 12.3mm , 1.23cm , 0.0123m 三个数据,都是三位有效数字。

2. “0”在有效数字中的作用

从上面的例子中可以看出,不管有效数字前面有几个“0”,都不影响有效数字位数,故观测数据前面的“0”不是有效数字。但观测数据中小数点后面的“0”则不可随意增减,这与纯数学上的表示意义完全不同。例如,图1-5所示的情况,应读为 4.30cm 。从数学的



$$L = 4.30\text{cm}$$

图1-5 尾数由目力估计为“0”的情况

角度上来讲,尾数上“0”的有、无所代表的意义是相同的;但从有效数字上来看,若读成 4.3cm ,则是二位有效数字,它表示是用最小刻度为 cm 的米尺来量度待测量,这与图1-5中所示量具的实际情况是不符的。可见,在观测数据时,即使观测者依目力所估计的读数为“0”,在数据记录中决不能随意舍去!否则就会损失观测结果的有效数字,而不能反

映测量仪表的精度。

3. 有效数字的科学表示方法

对于观测结果中出现的特大或特小数据或对观测数据进行单位换算时, 为避免不使有效数字位数与数值的大小发生矛盾或混淆, 常采用10的指数形式表示: 指数部分前面的系数为有效数字, 指数本身则不属有效数字。例如, 某一高电阻其值为 $21.0\text{k}\Omega$, 若用欧姆为单位表示成 21000Ω 时, 其有效数字已从三位变成了5位, 显然是错误的; 正确的表示应为 $2.10 \times 10^4\Omega$, 此时的有效数字仍为3位数, 但书写简便。在一般观测数据的科学表示方法中, 系数部分的小数点均位于第一位数的后面, 如 0.00257m , 则表示为 $2.57 \times 10^{-3}\text{m}$ 。

二 有效数字的运算规则

在观测数据中引进有效数字的概念, 不仅可以从有效数字的位数中反映测量仪表的精度, 而且可以使观测数据在进行运算时, 避免繁复的运算过程。为此, 必须研究有效数字运算时的规则。

在研究有效数字的运算规则前, 先要明确下述运算约定原则:

(1) 有效数字相互运算后的结果仍为有效数字, 且仅有最后一位为可疑数字, 而其它各位数均为可靠数字;

(2) 可疑数字与可疑数字相互运算后仍为可疑数字, 但进位数则视为可靠数;

(3) 可疑数字与可靠数字进行运算后仍为可疑数字;

(4) 可靠数字与可靠数字相互运算后仍为可靠数字;

(5) 尾数的舍入原则:

在有效数字的运算过程中, 常要遇到尾数舍入问题。现在通用的原则是: 尾数小于5则舍; 尾数大于5则入; 尾数等于5则将其前的数凑成偶数为止, 即其前若为偶数则去5, 其前若为奇数则去5进1, 奇数凑成偶数。这样的约定, 从总体上讲可以使尾数出现5时, 有的5入、有的5舍, 使因5本身引起的正、负误差有相互抵消的机会。

例1-6 将下列数据取4位有效数字

3.1415	→	3.142
27.172	→	27.17
4.5105	→	4.510
3.2165	→	3.216

在下面讨论有效数字运算规则的过程中, 在有效数字中的可疑数字上方加记“.”符号, 以与可靠数字相区别。如, 12.5cm 记为 $12.\dot{5}\text{cm}$

1. 有效数字的加减法运算规则

例1-7 计算 $10.\dot{1} + 1.52\dot{2} = ?$

$$\begin{array}{r} 10.\dot{1} \\ + 1.52\dot{2} \\ \hline 11.62\dot{2} \end{array} \Rightarrow \begin{array}{r} 10.\dot{1} \\ + 1.\dot{5} \\ \hline 11.\dot{6} \end{array}$$