

国家级物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

西南交通大学物理实验中心 编



科学出版社

国家级物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

西南交通大学物理实验中心 编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在总结长期的物理实验建设和教学改革经验基础上,按照教育部颁发的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》编写的。全书分为11章,包括26个实验,涉及力学、电磁学、光学、声音与波、热学、地球、近代物理及技术性实验的内容。

本书可作为高等工科院校各专业大学物理实验课教材,也可供广大工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/西南交通大学物理实验中心编. —北京:科学出版社, 2015.2

国家级物理实验教学示范中心系列教材

ISBN 978-7-03-043245-2

I. ①大… II. ①西… III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第022851号

责任编辑: 窦京涛 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2015年2月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016年2月第三次印刷 印张: 12 1/4

字数: 300 000

定价: 27.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

大学物理实验课是理工科学生必修的一门重要基础实验课. 按照教育部颁发的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》, 我们依照基本理论、基本实验技能和基本实验内容编写了这本教材.

本书的编写是在西南交通大学物理实验中心建设和实验教学改革经验积累的基础上进行的, 是集体智慧和集体劳动的结晶. 本书在编写过程中, 得到了物理实验中心广大老师的大力支持, 同时参考了许多高校的大学物理实验教材和一些仪器生产厂家提供的参考资料, 在此表示感谢.

参与本书编写的人员具体分工是姜向东编写第 1 章、第 2 章、第 4 章实验 4.1; 巴璞编写第 3 章实验 3.1、第 11 章实验 11.1、实验 11.2; 周勋秀编写第 3 章实验 3.2、第 6 章实验 6.1、第 11 章实验 11.4; 陈汉军编写第 4 章实验 4.2、第 11 章实验 11.3; 吴文军编写第 5 章实验 5.1; 冯振勇编写第 5 章实验 5.2、实验 5.3; 樊代和编写第 5 章实验 5.4、实验 5.5; 庄建编写第 6 章实验 6.2; 常相辉编写第 6 章实验 6.3、实验 6.4、实验 6.5; 胡清编写第 6 章实验 6.6、第 9 章; 陈桔编写第 6 章实验 6.7; 魏云编写第 7 章; 吴晓立编写第 8 章; 青莉编写第 10 章; 陈桔编写第 11 章实验 11.5.

由于编者水平所限, 书中难免存在缺点和不妥之处, 恳请读者提出宝贵意见和建议.

编 者

2015 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 误差理论知识	1
1.1 测量的基本概念	1
1.2 测量误差的基本概念	2
1.3 测量误差的分类	3
1.4 仪器误差	7
1.5 研究误差的意义	10
1.6 测量结果的评定和不确定度	10
1.7 测量结果的表示	14
第 2 章 数据处理基础知识	16
2.1 有效数字	16
2.2 有效数字的运算规则	17
2.3 微小误差测量原则	17
2.4 误差等量分配原则与测量仪器选择	18
2.5 数据处理的基本方法	18
第 3 章 常用仪器的原理及使用	25
3.1 电学实验基础知识	25
3.2 光学实验基础知识	28
第 4 章 力学	33
实验 4.1 杨氏弹性模量的测量	33
实验 4.2 刚体转动惯量的测定	38
第 5 章 电磁学	45
实验 5.1 示波器的使用	45
实验 5.2 电势差计的研究	56
实验 5.3 静电场的模拟实验	62
实验 5.4 电子束聚焦和偏转的研究	67
实验 5.5 霍尔元件参数的测量	72
第 6 章 光学	82
实验 6.1 光学基础实验	82
实验 6.2 分光计的调整与使用	87
实验 6.3 光栅常数的测量	94
实验 6.4 棱镜摄谱实验	97
实验 6.5 双棱镜干涉实验	102
实验 6.6 偏振光的研究	106

实验 6.7 迈克耳孙干涉仪调整和使用	111
第 7 章 声音与波	117
实验 7.1 示波器测超声波声速	117
实验 7.2 光速测量实验	123
第 8 章 热学	133
实验 8.1 准稳态法测定导热系数实验	133
实验 8.2 空气的比热容比测量	139
第 9 章 地球	146
实验 9.1 磁场的测量	146
第 10 章 近代物理	154
实验 10.1 光电效应法测普朗克常量	154
实验 10.2 弗兰克-赫兹实验	159
第 11 章 技术性实验	166
实验 11.1 单摆的研究	166
实验 11.2 电表改装与校准	168
实验 11.3 自组电桥实验	171
实验 11.4 硅太阳能电池特性的研究	180
实验 11.5 液晶的电光特性实验	186

第 1 章 误差理论知识

科学实验离不开测量,测量必然要存在误差.因此必须对误差的来源、性质及规律进行研究,以便能及时发现误差,并采取减小误差的措施.随着科学技术的发展,测量方法和技术的不断提高,尽管可将误差控制在越来越小的范围内,但始终不能完全消除.必须正确处理数据,有效地提高测量精度和测量结果的可靠程度.

误差理论与数据处理是以数理统计和概率论为数学基础的专门学科,涉及内容较广.近年来,误差的基本概念和处理方法有了较大发展,逐步形成了新的表示方法.本章仅限于介绍误差分析的初步知识,不进行严密的数学理论论证.

1.1 测量的基本概念

1. 测量

测量是指为确定被测对象量值而进行的实验操作.在测量过程中,通常将被测量与同类标准量进行比较,得到被测量的量值.例如,用游标卡尺测得一个圆柱体的直径为 38.64mm 等.由测量所得到的被测量的量值叫做测量结果,测量结果还应包括误差部分.

2. 测量的分类

测量按不同的方法分为直接测量与间接测量,按不同的形式分为等精度测量与不等精度测量,静态测量与动态测量等.

直接测量是指将被测量与标准量直接进行比较,或者用经标准量标定了的仪器或量具对被测量进行测量,从而直接获得被测量的量值.例如,用米尺测量长度,用温度计测量温度,用电流表测量电流等都是直接测量.

间接测量是依据相应的理论函数关系式,由直接测量量根据函数关系式计算出所要求的物理量.在物理实验中大多数物理量都是间接测量值.例如,单摆法测重力加速度 g 时, $g = 4\pi^2 L / T^2$, T 为周期, L 为摆长,都是直接测量值,而重力加速度 g 是间接测量值.

等精度测量是指在对某一物理量进行多次重复测量的过程中,每次的测量条件都相同.这些条件包括人员、仪器、方法等,由于测量条件相同,每次测量的可靠程度都相同,因此这样的测量是等精度测量.

不等精度测量是指在对某一物理量进行多次测量时,测量条件完全不同或部分不同,各测量结果的可靠程度自然也不同的一系列测量.例如,在对某一物理量进行多次测量时,选用的仪器不同、测量方法不同或测量人员不同等都属于不等精度测量.

一般来讲,保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的,但当某些条件的变化对结果影响不大时,可视为等精度测量.等精度测量的数据处理比较容易,所以物理实验中的测量通常认为是等精度测量.

3. 计量

计量是利用先进技术和法制手段实现单位统一和量值准确可靠的测量。计量具有准确性、一致性、历史性和法制性。尽管物理实验并不以计量为目的,但是计量与物理学密切相关。人类历史上三次大的技术革命都是以物理学的成就为理论基础的,技术革命促进了计量的发展,同时计量的发展也为物理现象的深入研究和广泛应用提供了重要手段。

4. 物理量的单位

物理量是由数值和单位两部分组成。不同的物理量有各自不同的单位。独立定义的单位称为基本单位,相应的物理量称为基本物理量。由基本单位导出的单位称为导出单位。

物理量单位基准的建立是随科学技术的发展而不断改进的。在物理学的发展过程中,使用过不同的单位制。

1960年,第十一届国际计量大会规定了用于一切计量领域的国际单位制(简称SI制),国际单位制规定了7个基本物理量单位,分别是长度单位米(m),时间单位秒(s),质量单位千克(kg),热力学温度单位开[尔文](K),电流单位安[培](A),发光强度单位坎[德拉](cd),物质的量单位摩尔(mol)。同时国际单位制中还规定了一系列配套的辅助单位和导出单位以及通用名称,形成了一套严密、完整、科学的单位制。为了确保计量单位的统一和量值的准确可靠,国务院规定以国际单位制为我国法定计量单位。

1.2 测量误差的基本概念

1. 真值

真值是指被测量量在其所处的确定条件下实际具有的真实量值。但由于测量误差的存在,真值一般无法得到,它是一个理想的概念,因此通常所说的真值都是相对真值。在实际测量中,上一级标准的示值对下一级标准来说,可视为相对真值。在多次重复测量中,可用修正过的测量值的算术平均值视为相对真值或约定真值。

2. 绝对误差

测量值与真值之差定义为误差,又称绝对误差。一般表示为

$$\Delta N = N - A \quad (1.2.1)$$

式中, N 为测量得到的值; A 为被测量量的真值; ΔN 为测量误差。

按照定义,误差是测量结果与客观真值之差,它既有大小又可正可负,不要理解误差是绝对值。误差是测量结果的实际误差值,其量纲与被测量的量纲相同。由于真值在绝大多数情况下无法知道,因此误差也是未知的,只能进行估计。

3. 相对误差

相对误差是测量值的绝对误差 ΔN 与其真值 A 之比,常用百分数表示,即

$$E = \frac{\Delta N}{A} \times 100\% \quad (1.2.2)$$

一般情况下,测量值与真值相差不会太大,故可以把误差与测量值之比作为相对误差,表示为

$$E = \frac{\Delta N}{N} \times 100\% \quad (1.2.3)$$

用相对误差能确切地反映测量效果.例如,测量长度为1000mm时,其绝对误差为5mm;而测量长度为10mm时,其绝对误差为1mm.尽管前者的绝对误差为后者的5倍,但前者的测量效果却比后者好,用相对误差的概念就能做出评价.

1.3 测量误差的分类

根据误差的性质和产生的原因,一般把误差分为系统误差、随机误差和粗大误差.

1. 系统误差

在同一量的多次测量过程中,符号和绝对值保持恒定或以确定的规律变化的测量误差称为系统误差.

系统误差决定测量结果的“正确”程度.系统误差与测量次数无关,因此,不能用增加测量次数的方法使其消除或减小.

许多系统误差可以通过实验确定并加以修正,但有时由于对某些系统误差的认识不足或没有相应的手段予以充分肯定,而不能修正.

产生系统误差的原因是多方面的,主要有测量仪器误差、理论方法误差、环境误差和个人误差等.

测量仪器误差是由于仪器本身的缺陷或没有按规定使用仪器而造成的.例如,仪器零点不准、天平两臂不等长等.

理论方法误差是由于测量所依据的理论公式本身的近似性,实验条件不能达到所规定的要求,或测量方法不适当所带来的误差.例如,单摆的周期公式成立的条件是:摆角趋于零,摆球的体积趋于零.这些条件在实验中是达不到的.另外,用伏安法测电阻时,电表内阻的影响等也会引起误差.

环境误差是由于各种环境因素,如温度、气压、振动、电磁场等与要求的标准状态不一致,引起测量设备的量值变化或机构失灵等产生的误差.

个人误差是由观测者本人生理或心理特点造成的.例如,估计读数时,有些人始终偏大,而有些人始终偏小等.正因为引起系统误差的因素多种多样,没有固定的模式,所以要减小和消除系统误差就要具体情况具体分析.应分别采用对比法、理论分析法或数据分析法来找出系统误差,提高测量的准确程度.

2. 随机误差

实验中即使采取了措施,对系统误差进行修正或消除,但仍存在随机误差在同一量的多次测量中,各测量数据的误差值或大或小,或正或负,以不可确定的方式变化的误差称为随机误差.

随机误差决定测量结果的“精密”程度.

随机误差的特点是,表面上单个误差值没有确定的规律,但进行足够多次的测量后可以

发现,误差在总体上服从一定的统计分布,每一误差的出现都有确定的概率。

随机误差是由许多随机因素综合作用造成的,这些误差因素不是在测量前就已经固有的,而是在测量中随机出现的。其大小和符号的正负各不相同,又都不很明显,所以随机误差不能完全消除,只能根据其本身存在的规律用多次测量的方法来减小。

应该说,关于随机误差的分布规律和处理方法,涉及了较多的数理统计和概率论知识,是比较复杂的,在这里只简单介绍正态分布的性质及特征量,详尽的讨论请查阅有关误差理论与数据处理的书籍。

实践表明,绝大多数随机误差分布都服从正态分布。正态分布具有有限性、抵偿性、单峰性和对称性。

作为随机变量,随机误差 δ 的统计规律可由分布密度 $f(\delta)$ 给出完整的描述。由随机误差的特性,从理论上可得到

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.3.1)$$

式中,参数 σ 称为标准差,其正态分布密度曲线如图 1.3.1 所示。

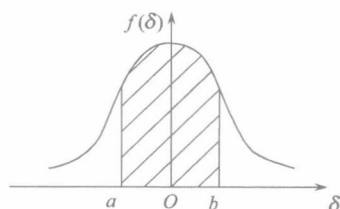


图 1.3.1 正态分布密度曲线

分布密度 $f(\sigma)$ 从 $-\infty$ 到 ∞ 的积分等于 1, 即

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\delta) d\delta = 1 \quad (1.3.2)$$

这一积分是整个分布密度曲线下的面积,代表测量的随机误差全部取值的概率。而在任意区间 $[a, b]$ 内的概率为

$$P = \int_a^b f(\delta) d\delta \quad (1.3.3)$$

这一概率是区间 $[a, b]$ 上分布密度曲线下的面积。

分布密度给出了随机误差 δ 取值的概率分布。这是对随机误差统计性的完整描述,但在一般测量数据处理中,并不需要给出随机误差的分布密度,通常只需给出一个或几个特征参数,即可对随机误差的影响做出评定。

表示测量结果的精度参数,目前常用标准差或极限误差等,下面给出有关标准差的一些基本概念。

1) 算术平均值

对同一量的 n 次重复测量中,设测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 根据最小二乘法原理可以证明,其算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.3.4)$$

是被测量真值的最佳估计值,可视为相对真值,这正是为什么常用算术平均值作为测量结果的原因。

2) 标准差

标准差的计算可由贝塞尔(Bessel)公式得到

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.3.5)$$

标准差越小,相应的分布曲线越陡峭,说明随机误差取值的分散性小、测量精度高;标准差 σ 大,则测量精度低. 图 1.3.2 所示为不同 σ 值的两条正态分布密度曲线的形状. 通过计算还可以得到

$$P = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\delta) d\delta = 0.683 \tag{1.3.6}$$

$$P = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\delta) d\delta = 0.997 \tag{1.3.7}$$

其意义表示,某次测量值的随机误差在 $-\sigma \sim \sigma$ 的概率为 68.3%,在 $-3\sigma \sim 3\sigma$ 的概率为 99.7%,如图 1.3.3 所示.

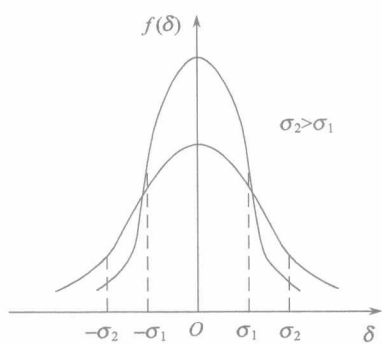


图 1.3.2 不同 σ 值的分布密度曲线

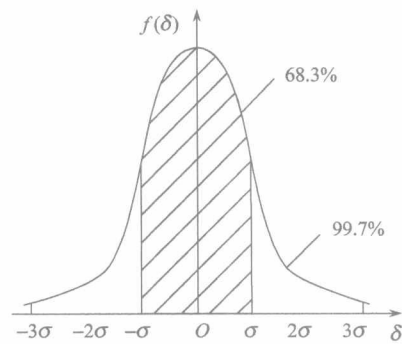


图 1.3.3 分布密度曲线与概率

3) 算术平均值的标准差

实际测量中,由于测量次数有限,如果进行多组重复测量,则每一组所得到的算术平均值一般也不会相同,因此,算术平均值也存在误差,用算术平均值的标准差 $\sigma_{\bar{x}}$ 表示

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \tag{1.3.8}$$

其意义表示,测量值的平均值的随机误差在 $-\sigma_{\bar{x}} \sim \sigma_{\bar{x}}$ 的概率为 68.3%;在 $-3\sigma_{\bar{x}} \sim 3\sigma_{\bar{x}}$ 的概率为 99.7%,或者说测量值的真值在 $[\bar{x} - \sigma_{\bar{x}}] \sim [\bar{x} + \sigma_{\bar{x}}]$ 范围内的概率为 68.3%;在 $[\bar{x} - 3\sigma_{\bar{x}}] \sim [\bar{x} + 3\sigma_{\bar{x}}]$ 范围内的概率为 99.7%.

需要注意, σ 与 $\sigma_{\bar{x}}$ 是两个不同的概念,标准差 σ 反映了一组测量数据的精密程度,而算术平均值的标准差 $\sigma_{\bar{x}}$ 反映了算术平均值接近真值的程度.

从贝塞尔公式(1.3.5)可以看出,随着测量次数 n 的增加,标准差 σ 趋于稳定,而根据式(1.3.8), $\sigma_{\bar{x}}$ 随 n 的增加而减小,所以测量精度随 n 的增加会有所提高. 因此,在实际测量中,应根据 σ 稳定值(由测量仪器的精度所决定)和对结果的精度要求,合理地选定测量次数.

例 1.1 用千分尺测一圆柱体的直径 10 次(单位: mm),数据分别为 2.474, 2.473, 2.478, 2.471, 2.480, 2.472, 2.477, 2.475, 2.474, 2.476,表示出测量结果.

解

$$\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 2.475 \text{ mm}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{7 \times 10^{-3}}{9}} = 0.028 \text{ mm}$$

$$\sigma = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 0.009 \text{ mm}$$

所以测量结果

$$x = \bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}} = (2.475 \pm 0.009) \text{ mm} \quad (P = 68.3\%)$$

或

$$x = \bar{x} \pm 3\sigma_{\bar{x}} = (2.475 \pm 0.027) \text{ mm} \quad (P = 99\%)$$

上面分别讨论了系统误差与随机误差,一般情况下,两种误差同时存在且相互影响,这就需要用到误差的合成。

3. 粗大误差

粗大误差又称疏忽误差或过失误差,它是由于测量者技术不熟练,测量时不仔细,或外界严重干扰等原因造成的。粗大误差超出了正常的误差分布范围,它会对测量结果产生明显的歪曲,因此,一旦发现含有粗大误差的测量数据(称为异常数据),应将其剔除不用。

对于粗大误差,除了设法从测量结果中发现和鉴别而加以剔除外,更重要的是以严格的科学态度来认真做实验,做好每一件事情。

在判别某个测量数据是否含有粗大误差时,要特别慎重,仅凭直观判断常难以区别出粗大误差和正常分布的较大误差。若主观地将误差较大但属正常分布的测量数据判定为异常数据而剔除,尽管看起来精度很高,然而那是虚假和不可靠的。

判别异常数据的方法一般采用 3σ 准则(微小误差准则)。按照正态分布,误差落在 $\pm 3\sigma$ 以外的概率只有 0.3%。因而,可以认为,在有限次重复测量中误差超过 $\pm 3\sigma$ 的测量数据是由于过失或其他因素造成的,为异常数据,应当剔除。

4. 精密度、正确度和准确度

为了对测量结果做出评定,人们经常用“精度”一类的词来形容测量结果的误差大小。许多教材中均有正确度、精密度、准确度等名词术语,《计量名词术语定义》中规定其含义如下。

精密度:表示多次测量时,测量值的集中程度,它是测量值的随机误差大小的量度。与测量值的系统误差无关。

正确度:表示测量值与真值符合的程度,它是测量值的系统误差大小的量度。与测量值的随机误差无关。

准确度:是对测量数据精密度和正确度的综合评定。表示测量值与被测量真值之间的一致程度。准确度又称精确度。

作为一种形象的说明,可以参照图 1.3.4 来帮助理解上述三个概念。

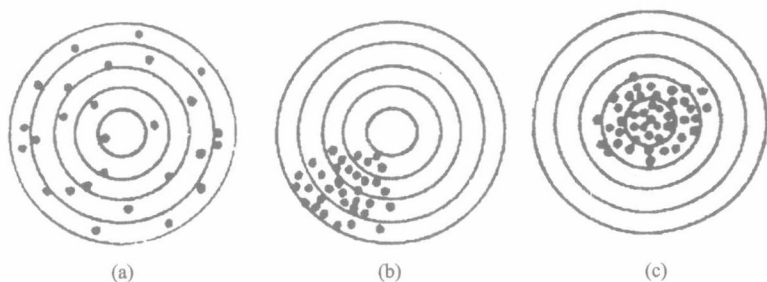


图 1.3.4

1.4 仪器误差

实验中所用仪器给测量结果带来一定的误差,这种误差称为仪器误差. 仪器误差的来源很多,它与仪器的原理、结构和使用环境等有关. 一般情况下,仪器误差既包括系统误差,又包括随机误差. 究竟以哪种误差为主,对不同仪器是不尽相同的. 实际上,人们通常关心的是仪器提供的测量结果与真值的一致程度,是测量结果中各系统误差与随机误差的综合估计值. 在物理实验中,把由国家技术标准规定的仪器和量具的精度等级对应的误差和允许误差范围称为仪器最大允许误差(仪器误差限). 它是指在正确使用仪器的条件下,测量结果和被测量真值之间可能产生的最大误差. 在测量中常常可用仪器的最大允许误差的绝对值表示仪器的误差限. 下面简要介绍几种常用仪器和量具的最大允许误差.

1. 长度测量仪器

物理实验中最基本的长度测量仪器是钢直尺、钢卷尺、游标卡尺和螺旋测微计(又称千分尺). 这些长度测量仪器的主要技术指标及最大允许误差如表 1.4.1 所示.

表 1.4.1 常用长度测量仪器的技术指标及最大允许误差

仪器名称	量 程	分度值	最大允许误差
钢直尺	150mm	1mm	$\pm 0.10\text{mm}$
	500mm	1mm	$\pm 0.15\text{mm}$
	1000mm	1mm	$\pm 0.20\text{mm}$
钢卷尺	1m	1mm	$\pm 0.8\text{mm}$
	2m	1mm	$\pm 1.2\text{mm}$
游标卡尺	125mm	0.02mm	$\pm 0.02\text{mm}$
		0.05mm	$\pm 0.05\text{mm}$
外径千分尺	25mm	0.01mm	$\pm 0.004\text{mm}$

2. 天平

天平的感量定义为:天平指针偏转一个最小刻度时,在秤盘上所要增加的砝码. 天平的灵敏度定义为:天平感量的倒数. 按天平感量与最大称量之比将天平分为 10 级,如表 1.4.2

所示. 天平的技术参数和最大允许误差如表 1. 4. 3 所示.

表 1. 4. 2 天平级别的划分

精度级别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
感量/最大称量	1×10^{-7}	2×10^{-7}	5×10^{-7}	1×10^{-6}	2×10^{-6}	5×10^{-6}	1×10^{-5}	2×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-4}

表 1. 4. 3 天平的技术参数和最大允许误差

仪器名称	量程	分度值	最大允许误差
4~10 级天平(物理天平)	500g	0. 05g	综合误差 $\begin{cases} \text{满量程 } 0. 08\text{g} \\ \frac{1}{2} \text{ 量程 } 0. 06\text{g} \\ \frac{1}{3} \text{ 量程 } 0. 04\text{g} \end{cases}$
1~3 级天平(分析天平)	200g	0. 1mg	综合误差 $\begin{cases} \text{满量程 } 1. 3\text{mg} \\ \frac{1}{2} \text{ 量程 } 1. 0\text{mg} \\ \frac{1}{3} \text{ 量程 } 0. 7\text{mg} \end{cases}$

注:这里认为砝码是精确的,不考虑砝码误差.

3. 时间测量仪器

机械停表、石英电子秒表和数字毫秒表是物理实验中最常用的计时表. 在物理实验中, 用机械停表对较短时间进行测量,其最大允许误差可取为 0. 01s.

对于石英电子秒表,最大允许误差与测量值有关,其关系为

$$\text{最大允许误差} = (5. 8 \times 10^{-6} t + 0. 01) \quad (\text{s})$$

式中, t 为时间的测量值.

对于数字毫秒表,最大允许误差取它的最小分度值. 例如,时基值为 1 ms,那么最大允许误差就取为 1ms.

4. 温度测量仪器

实验室中常用的测温仪器有水银温度计、热电偶和电阻温度计等. 表 1. 4. 4 给出了常用的温度计和热电偶的测量范围及最大允许误差.

表 1. 4. 4 常用温度计、热电偶的测量范围和最大允许误差

仪器名称	测量范围	最大允许误差
实验室用水银-玻璃温度计	- 30~300℃	0. 05℃
一等标准水银-玻璃温度计	0~100℃	0. 01℃
工业用水银-玻璃温度计	0~150℃	0. 5℃
标准铂铑-铂热电偶	600~1300℃	0. 1℃
工作铂铑-铂热电偶	600~1300℃	0. 33%×被测温度

5. 电学量测量仪器

电学仪表按国家标准根据准确度大小划分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 七个等级. 其对应的最大引用误差不超过 $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.2\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 1.5\%$ 、 $\pm 2.5\%$ 和 $\pm 5.0\%$. 准确度等级表示仪表在标准工作条件下(位置放置正确、周围温度为 20°C 、仪表周围磁场近似为零),可能发生的最大绝对误差与仪表的量程的百分比. 因此仪表的误差限可通过准确度等级的有关公式求出.

1) 电磁仪表(指针式电流表、电压表)

$$\Delta_{\text{仪}} = a \% \times N_{\text{m}} \quad (1.4.1)$$

式中, $\Delta_{\text{仪}}$ 为电表的误差限; N_{m} 为电表的量程; a 为电表的准确度等级.

例 1.2 一量限为 300V 的电压表,其最大绝对误差为 1.2V,求该电压表的最大引用误差和准确度等级.

解

$$r_{\text{m}} = \frac{1.2}{300} \times 100\% = 0.4\%, \text{准确度等级为 0.5 级.}$$

例 1.3 经检定发现,量程为 250V 的 2.5 级电压表在 10V 处的示值误差最大,误差值为 5V,问该电压表是否合格?

解 按电压表准确度等级规定,2.5 级表的最大引用误差不超过 $\pm 2.5\%$ 的范围,而该表的最大引用误差为 $r_{\text{m}} = \frac{5}{250} \times 100\% = 2\%$,故该电压表检定结果为合格.

应当指出,仪表的准确度等级只是从整体上反映仪表的误差情况,在使用仪表进行测量时,被测量的值的准确度往往低于仪表的准确度,而且如果其值离仪表的量限越远,其测量的准确度越低. 被测量的值最好大于 $2/3$ 量程.

2) 电阻箱

测量用电阻箱按其准确度可分为 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 等级别. 准确度等级表示电阻箱在标准工作条件下(环境温度 $(20 \pm 8)^{\circ}\text{C}$, 相对湿度小于 80%),电阻箱电阻相对误差的百分数. 电阻箱电阻的误差与电阻箱旋钮的接触电阻之和构成了电阻箱的最大允许误差. 那么电阻箱的仪器误差限可表示为

$$\Delta_{\text{仪}} = (aR + mb) \% \quad (1.4.2)$$

式中, $\Delta_{\text{仪}}$ 为电阻箱的误差限; a 为电阻箱的准确度等级; R 为所测电阻的阻值; m 为测量时所用电阻箱旋钮的个数; b 为与电阻箱的准确度级别有关的旋钮接触电阻,当准确度等级大于等于 0.1 级时,电阻箱的旋钮接触电阻 $b = 0.5\Omega$,当准确度等级小于等于 0.05 级时,电阻箱的旋钮接触电阻 $b = 0.2\Omega$.

3) 直流电势差计

直流电势差计的最大允许误差由两部分组成,一部分与测量值有关;另一部分与基准值有关. 直流电势差计的误差限表示为

$$\Delta_{\text{仪}} = a \% \times \left(u + \frac{u_0}{10} \right) \quad (1.4.3)$$

式中, $\Delta_{\text{仪}}$ 为直流电势差计的误差限; a 为直流电势差计的准确度等级; u 为测量值; u_0 为直

流电势差计的基准值,规定为最大测量盘第 10 点的电压值。

4) 直流电桥

与直流电势差计相似,直流电桥的误差限表示为

$$\Delta_{\text{仪}} = a \% \times \left(R + \frac{R_0}{10} \right) \quad (1.4.4)$$

式中, $\Delta_{\text{仪}}$ 为直流电桥的误差限; a 为直流电桥的准确度级别; R 为测量值; R_0 为直流电桥的基准值,规定为最大测量盘第 10 点的电阻值。

仪器误差限提供的是误差绝对值的极限值,并不是测量的真实误差,我们无法确定其符号,因此它仍然属于不确定度的范畴。

1.5 研究误差的意义

研究测量误差的规律具有普遍意义。研究这一规律的直接目的,一是要减小误差的影响,提高测量准确度;二是要对所得结果的可靠性做出评定,给出准确度的估计。

只有掌握测量误差的规律性,才能合理地设计测量仪器,拟定最佳的测量方法,正确地处理测量数据,以便在一定的条件下,尽量减小误差的影响,使所得到的测量结果有较高的可信程度。

随着科学技术的发展和生产水平的提高,对测量技术的要求越来越高。可以说,在一定程度上,测量技术的水平反映了科学技术和生产发展的水平,而测量准确度则是测量技术水平的主要标志之一。在某种意义上,测量技术进步的过程就是克服误差的过程,就是对测量误差规律性认识深化的过程。

当然,无论采取何种措施,测量误差总是存在的,准确度的提高总要受到一定的限制。因而就要求对测量准确度做出评定,任何测量总是对应于一定的准确度的,准确度不同,其使用价值就不同,可以说,未知准确度的测量是没有意义的。为了给出准确度,应掌握测量误差的特征规律,以便对测量的准确度做出可靠的评定。

1.6 测量结果的评定和不确定度

对测量结果的评定,目前国际上形成了较为统一的测量不确定度的表达方式,我国也实行了相应的技术规范。物理实验中已逐步采用不确定度来评定测量结果。由于不确定度的计算较为复杂,许多教材中采用了不同的简化模式,自然评定结果也不相同。本教材遵从国家标准,所做的简化处理不应冲淡或模糊对基本概念的理解,以便在教学中施行。

1. 不确定度

不确定度是指由于误差存在而产生的测量结果的不确定性,表征被测量的真值所处的量值范围的评定。

误差的定义是测量值与真值之差,是一个确定值,但真值不能得到,误差也就无法知道。而标准误差、极限误差等是可以估算的,但它们表示的是测量结果的不确定性,与误差定义并不一致。显然,从定义上看,不确定度比误差更合理一些。

2. 不确定度的两类分量

传统上把误差分为随机误差和系统误差,但在实际测量中,有相当多情形很难区分误差的性质是随机的还是系统的,有的误差还具有随机和系统两重性.例如,电测量仪表的准确度等级误差就是系统和随机误差的综合,一般无法将系统误差和随机误差严格分开计算.而不确定度取消了系统误差和随机误差的分类方法,不确定度按计算方法的不同分为 A 类分量和 B 类分量.

A 类不确定度是指可以用统计方法评定的不确定度分量,如测量读数具有分散性,测量时温度波动影响等.这类不确定度被认为服从正态分布规律.因此,可以用测量平均值的标准差

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1.6.1)$$

来计算 A 类不确定度,也可以用最大偏差法、极限误差法等.

B 类不确定度是不能由统计方法评定的不确定度分量,在物理实验教学中,作为简化处理,一般只考虑由仪器误差及测试条件不符合要求而引起的附加误差.具体分析 B 类不确定度的概率分布十分困难,而仪器的基本误差、仪器的分辨率引起的误差、仪器的示值误差、仪器的引用误差等仪器误差都满足均匀分布.因此,教学中通常对 B 类不确定度采用均匀分布的假定,则 B 类不确定度为

$$u_B = \frac{\Delta_s}{\sqrt{3}} \quad (1.6.2)$$

式中, Δ_s 为仪器的基本误差或允许误差,或者根据准确度等级确定.一般的仪器说明书中都由制造厂或计量检定部门注明仪器误差.

需要指出的是, A 类不确定度和 B 类不确定度与随机误差和系统误差并不存在简单的对应关系,不要受习惯概念束缚.

总不确定度是由不确定度的两类分量合成的,合成不确定度 u 可表示为

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (1.6.3)$$

3. 直接测量的不确定度

直接测量的不确定度计算比较简单,下面通过例子加以说明.

例 1.4 用毫米刻度的米尺,测量物体长度 10 次(单位:cm),其测量值分别为 53.27, 53.25, 53.23, 53.29, 53.24, 53.28, 53.26, 53.20, 53.24, 53.21, 试计算不确定度,并写出测量结果.

解 (1) 计算平均值

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{n} \sum x_i = \frac{1}{10} \times (53.27 + 53.25 + \cdots + 53.21) \\ &= 53.24(\text{cm}) \end{aligned}$$

(2) 计算 A 类不确定度

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$