

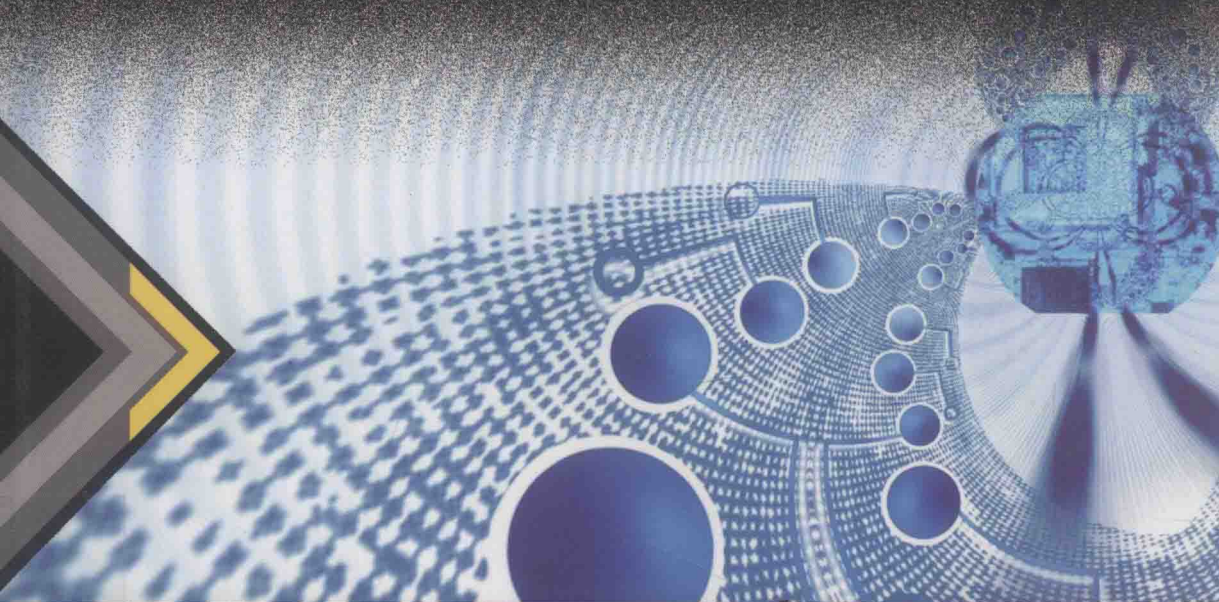


杨虹 主编

Daxue Wuli Shiyan

大学物理实验

(第二版)



科学出版社

大学物理实验

(第二版)

杨 虹 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是参照全国工科物理实验课程指导组制定的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，结合北京信息科技大学近几年开设的物理实验内容和学生特点，编写的物理实验教材。全书分为绪论、力学热学实验、电磁学实验、光学实验和近代及综合物理实验五大部分，共选入 26 个实验，内容比较全面，可以满足一般工科院校的教学要求。

本书可以作为普通高等工科院校、综合大学及师范类非物理专业的大学物理实验教学用书，也可供相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/杨虹主编. 第二版. —北京: 科学出版社, 2014. 2

ISBN 978 - 7 - 03 - 039701 - 0

I. ①大… II. ①杨… 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(2014)第 020412 号

责任编辑：谭宏宇 郭建宇

责任印制：刘 学/封面设计：殷 靓

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>

南京展望文化发展有限公司排版

骏杰印刷厂印刷

科学出版社出版 各地新华书店经销

*

2004 年 2 月第 一 版 开本：B5(720×1000)

2014 年 2 月第 二 版 印张：12 1/2

2014 年 2 月第八次印刷 字数：237 000

定价：31.00 元

《大学物理实验》(第二版)编委会

主 编 杨 虹
编 委 姜 峰 沈 端 王彩霞 杨 虹
 张苍山 赵 晖 王彦霞 吉 萍
 胡纪平 黄文奇

第二版前言

本书是参照全国工科物理实验课程指导组制定的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，结合北京信息科技大学近几年开设的实验，编写的物理实验教材。

本书分为五个部分：绪论介绍了误差理论基本知识、基本数据处理基本知识和基本实验方法；力学热学实验介绍了一些基本物理量的测量、基本量具的正确使用方法，考虑到初做实验的学生可能对实验的全过程缺乏应有的认识，在相关实验中分别提出了具体的要求；电磁学实验和光学实验分别介绍了电磁学/光学实验的操作规范和各种典型的电磁/光学测量方法；近代及综合物理实验选编了4个近代物理实验内容、2个内容比较综合的新实验以及1个包含7项简单设计性实验的内容。全书共有26个实验，内容比较全面，可以满足一般工科院校的教学要求。

本书在编写时，注重教材的科学性、系统性以及它的实用性。考虑到物理实验课程面向低年级学生的特点，对于基本实验，尽量做到实验原理清晰，实验方法、内容明确具体；实验数据表格依内容不同，有的在书中给出，有的要求学生自拟；设计性实验则只提出实验任务和基本要求，给予适当的提示，主要让学生自主完成。

参加本书编写的有杨虹、姜峰、沈端、张苍山、王彩霞、王彦霞、吉萍、胡纪平、黄文奇、赵晖。

在编写本书时参阅了许多兄弟院校的相关教材，在此对教材作者表示衷心的感谢。

由于编者的知识水平和教学经验不足，书中难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

编者

2013年9月

目 录

第二版前言

绪 论

一、物理实验课的地位、目的和任务	1
二、物理实验课的基本程序和规则	1
三、误差理论基本知识	2
四、数据处理基本知识	15
五、基本实验方法	18

第一部分 力学热学实验

实验一 力学基本测量	27
实验二 用拉伸法测定金属丝的杨氏模量	36
实验三 用气垫导轨装置研究物体在斜面上的运动	42
实验四 刚体的转动惯量	49
实验五 空气比热容比测定	56

第二部分 电磁学实验

实验六 制流电路、分压电路和电学实验基础知识	59
实验七 惠斯通电桥	72
实验八 用双电桥测量低电阻	77
实验九 地磁场测定	82
实验十 示波器的使用	88
实验十一 利用霍尔效应测磁场	95
实验十二 静电场模拟	100

第三部分 光学实验

实验十三 薄透镜焦距的测定	105
实验十四 分光计的调节和三棱镜顶角的测定	113
实验十五 光栅的衍射	120
实验十六 双棱镜干涉	124

实验十七 牛顿环和劈尖干涉	129
第四部分 近代及综合物理实验	
实验十八 光电效应实验及普朗克常数的测量	135
实验十九 迈克耳孙干涉仪的调节和使用	141
实验二十 密立根油滴实验	149
实验二十一 超声声速测量	156
实验二十二 动态悬挂法测定金属材料的杨氏模量	163
实验二十三 核磁共振(NMR)实验	166
实验二十四 设计性实验	172
实验二十五 全息照相	182
实验二十六 光敏传感器的光电特性研究	186
参考文献	194

绪 论

一、物理实验课的地位、目的和任务

1. 物理实验课的地位

物理学从本质上说是一门实验科学。物理学中每个概念的确立,原理和定律的发现,都有坚实的实验基础。纵观整个物理学的发展史,许多新的突破,常常是通过新的实验技术和方法的发展而促成的,同时,建立起来的理论正确与否也必须通过实验来验证。在科学技术高度发展的今天,物理实验的思想、方法、技术、仪器已经普遍地用在自然科学的许多领域和工程技术的许多部门,并日益向生产和生活的各个领域渗透。因此可见物理实验的重要性。

大学物理实验是对学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修课程,是大学生接受系统的实验方法和实验技能训练的开端。学习物理实验应该按照循序渐进的原则,学习物理实验的方法、了解科学实验的主要过程与基本方法,为今后的学习和工作打下良好的实验基础。

2. 物理实验课的目的和任务

物理实验课的目的是为学生今后系统地进行实验方法和实验技能的训练打下一个良好的基础,基本任务是:

1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,使学生进一步掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能,加深对物理学原理的理解。

2) 培养与提高学生从事科学实验的基本素质:理论联系实际、实事求是的科学作风,遵守操作规程、爱护公共财物的优良品德,不怕困难、主动进取的探索精神。

3) 培养与提高学生的多种能力:自学能力、动手能力、思维判断能力、书写表达能力以及初步的实验设计能力。

二、物理实验课的基本程序和规则

1. 物理实验课的基本程序

物理实验课的基本程序一般分为三个阶段:实验前的预习、实验的进行、写实

验报告。

(1) 实验前的预习

预习的要求：理解所做实验的实验原理、了解实验的过程，以便实验时抓住关键，能够较好地控制实验的物理过程和物理现象，迅速、准确地获得需要测量的数据，并根据要求写出预习报告。预习报告应写以下内容：简单实验原理（基本原理图、线路图、公式等）、实验内容及数据表格、注意事项。

(2) 实验的进行

实验开始前熟悉仪器，了解仪器的工作原理和使用方法，然后将仪器按要求安装调试好；在观察到相应的实验现象后，测量有关物理量，测量数据记入预习报告的数据表格内，并记录所用仪器；记录的数据要实事求是，不要按臆想的“规律”改变数据。

(3) 写实验报告

实验报告是实验工作的全面总结，要用简洁的形式将实验结果完整又真实地表达出来。写报告要求：字迹端正、文字通顺、公式清楚、图表规矩、结果正确、讨论认真。完整的实验报告通常包括下列部分：

① 实验名称；② 实验目的；③ 简要的实验原理、计算公式和必要的线路图；④ 仪器设备及其量程、级别、号码；⑤ 实验内容、数据记录；⑥ 数据处理；⑦ 误差分析；⑧ 明确的实验结果表达式；⑨ 思考题及其他实验问题的讨论。

2. 物理实验课的规则

1) 实验前必须认真预习，了解实验目的、原理、测量方法、使用仪器、实验内容、注意事项等，并按要求写出预习报告，预习不符合要求者不准进行实验。

2) 准时到实验室上课。

3) 做实验时要严肃认真，积极思考。

4) 仪器操作按有关规程和注意事项进行，损坏仪器要赔偿。

5) 实验完毕应经教师检验数据、签字后，再整理仪器，然后离开实验室。

三、误差理论基本知识

(一) 测量

为确定被测对象的量值而进行的一组操作称为测量。量值包含数值及单位，例如：1.6 m、17.8 s 和 4.5 kg 等。

按照测量值获得的方法不同，测量分为直接测量和间接测量。

直接从仪器或器具上读出待测量的大小，称为直接测量。例如：用米尺测量长度，用温度计测量温度，用秒表测量时间以及用电表测量电流和电压等都是直接

测量,相应的被测物理量称为直接测量量。

如果待测量的量值是由若干个直接测量量经过一定的函数运算后才获得的,则称为间接测量。例如:用单摆测量重力加速度 g ,应先测出摆长 L 和周期 T ,再由公式 $g = 4\pi^2 L/T^2$ 计算出 g ,这样 g 的测量即为间接测量, g 称为间接测量量。

按照测量条件的不同,测量分为等精度测量和不等精度测量。

在相同的测量条件下进行的一系列测量称为等精度测量。例如:同一个人,用同一个仪器,采用同样的测量方法,对同一个待测量连续进行多次测量,没有理由认为某一次测量比其他次测量更为精确,因此可以说这些测量的可靠程度都相同,故称之为等精度测量,这样的一组测量值称为一个测量列。

在不同的测量条件下进行的一系列测量称为不等精度测量。

在实验中进行多次重复测量时应尽量保持等精度测量。等精度测量的误差分析和数据处理比较容易,本书所介绍的误差和数据处理知识都是针对等精度测量的。

(二) 测量误差

误差存在的必然性和普遍性,已为长期科学实践所证明。因此,分析测量中可能产生的各种误差,尽可能地消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差做出估计,是物理实验和许多科学实验中必不可少的工作。

物理实验中讨论的误差是指测量值 N 与客观实际值 N_0 (真值)之间的差值,测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差可以用绝对误差表示,也可用相对误差表示。

$$\text{绝对误差} \quad \Delta N = N - N_0$$

$$\text{相对误差} \quad E = \frac{\Delta N}{N_0} \times 100\%$$

被测量的真值是一个理想概念,一般说来真值是不知道的。在实际测量中常用单次测量值(只测一次的情况)或多次测量经过修正后的算术平均值来代替真值,称为约定真值。

(三) 误差的分类

误差按其性质和特点可分为三类,系统误差、随机误差和粗大误差。三类误差的性质不同,处理方法也不同。

1. 系统误差

在相同条件下,多次测量同一量值时,其误差的大小和符号保持不变或随着测量条件的改变而有规律地变化,这类误差称为系统误差,其特征是具有确定性。它

来源于：仪器构造上的不完善，仪器未经很好校准，测量时外部条件的改变，测量者的固有习惯，测量所依据的理论的近似、测量方法和测量技术的不完善等等。系统误差的减少或消除是个复杂的问题，只有在很好地分析了整个实验所依据的原理、方法以及测量过程的每一步和所用的各件仪器，从而找出产生误差的各个原因，才有可能设法在测量结果中消除或减少它的影响。

系统误差按掌握程度可分为已定系统误差和未定系统误差。

已定系统误差：大小和符号(方向)已知，实验中必须修正。修正已定系统误差是大学物理实验基本技术和技能之一。例如仪器的零点读数误差、标准电池随温度变化引起的误差等，可以依据实验原始读数、仪器说明书或者行业标准、国家标准、国际标准直接进行修正；伏安法测电阻中接线方法引起的误差等，可以依据不同的接线方法和电压表、电流表的内阻值进行计算后再加以修正。

未定系统误差：大小和符号(方向)至少有一未知，实验中不能对其数值进行修正。有些未定系统误差可以采用改变实验条件或测量方法加以减小甚至消除，如：物理天平不等臂引起的误差、滑线式惠斯通电桥测电阻中电阻丝粗细不均匀引起的误差等，可以用复测法减小或消除；分光仪度盘(游标盘和刻度盘)安装不同心产生的误差，可以在设计制造中采用双游标的方法加以消除。对于不能消除的未定系统误差，大学物理实验中要求判断其误差限，一般可以用仪器误差来代替。

系统误差的一般处理方法：

- 1) 能避免其出现的系统误差，尽可能不让它在实验中出现。
- 2) 难以避免其出现，可采取相应的实验方法消除它。
- 3) 上述两种方法无法消除，能通过计算或实验求得系统误差，引入修正量修正实验结果。
- 4) 无法用上述三种方法消除，可以估计其最大值，按随机误差处理。

2. 随机误差

在相同条件下，多次测量同一量值时，即使已经消除了系统误差，测量误差的绝对值和符号也会以不可预知的方式变化，这类误差称为随机误差，其特征是不确定性。在测量次数少时，显得毫无规律，但当测量次数足够多时，则会发现随机误差是按一定的统计规律分布的。常见的统计分布有正态分布、 t 分布、均匀分布等。

随机误差的分布特性：

- 1) 单峰性：小误差(绝对值)出现的机会比大误差出现的机会(概率)大。
- 2) 对称性：大小相同，符合相反的误差出现的机会相等。
- 3) 有界性：在一定条件下，随机误差不会超过某一界限。

由此可导出，随着测量次数的增加，随机误差的代数和趋于零，该性质称为随

机误差的的抵偿性。这正是多次测量可以减小随机误差的原因。测量值的分散程度直接体现随机误差的大小,测量值越分散,测量的随机误差就越大。

3. 随机误差与系统误差的关系

系统误差的特征是其确定性,而随机误差的特性则是其随机性,二者经常同时存在于一切科学实验中,它们之间是互相联系的,有时难于严格区分,通常把一些不可定的系统误差看作随机误差;也常常把一些可定的但规律过于复杂的系统误差当作随机误差来处理,即系统误差随机化,从而使得部分误差被抵偿以得到较为准确的结果。

评价测量结果,常用到精密度、正确度和准确度这三个概念。

1) 精密度:反映随机误差的大小。

2) 正确度:反映系统误差的大小。

3) 准确度:反映随机误差和系统误差合成后的综合误差的大小。

对同一物理量进行多次等精度测量,其结果也不完全相同。这就好比打靶,弹着点会有一些的弥散性,如图 0-1 所示。图 0-1(a)反映随机误差大而系统误差小,表示精密度低,正确度高;图 0-1(b)反映随机误差小而系统误差大,精密度高而正确度低;图 0-1(c)反映随机误差和系统误差均小,即综合误差小,准确度高。

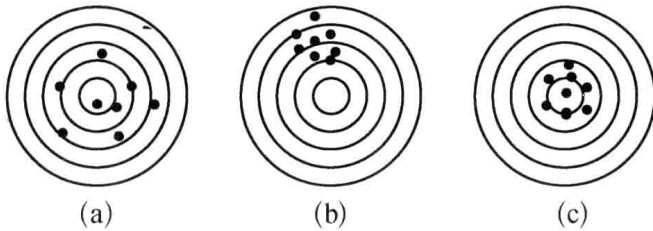


图 0-1 随机误差与系统误差的关系

4. 粗大误差

对测量结果产生明显歪曲的、数值比较大的误差称为粗大误差(简称粗差)。应防止粗差出现,实验时要注意理论上的约束条件,明确观测对象,安排仪器时要防止互相干扰,并注意作好数据表格和记录好原始数据。含有粗差的测量值称为坏值或异常值,在实验测量过程中或数据处理时应依照($3\sigma_r$ 法则)判据加以剔除。

(四) 随机误差的统计处理方法

1. 正态分布

正态分布(又称高斯分布)是误差理论中最重要的一种分布。从概率论的“中心极限定理”可知,一个随机变量如果是大量相互独立的、微小因素影响的总效果,这个随机变量就近似地服从正态分布。物理测量中的随机误差,往往是观察者不能控制的大量偶然因素作用的结果,所以大多数物理测量服从正态分布。

图 0-2 为正态分布曲线。正态分布的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} = \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad (-\infty < x < +\infty) \quad (0-1)$$

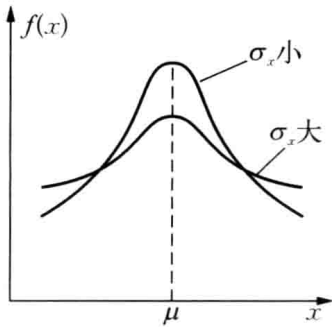


图 0-2 正态分布曲线

其中 μ 和 σ_x 为分布参数, n 为测量次数。 μ 为正态分布的数学期望, 表示 x 出现几率最大的值, 消除系统误差后, μ 通常就是 x 的真值。

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum x_i}{n} \quad (0-2)$$

σ_x 为正态分布的均方根差, 它决定了分布线型的宽窄。

$$\sigma_x = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (0-3)$$

σ_x 直接反映了分布的离散程度, σ_x 愈小, 分布曲线愈陡, 数据愈集中, 重复性愈好。 σ_x 大, 则正好相反。实际测量的任务就是通过测量数据求得 μ 和 σ_x 的值。

$P = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$ 是随机变量 x 出现在 $[x_1, x_2]$ 区间的概率, 称为置信概率。与置信概率对应的区间称为置信区间。显然, 置信区间扩大, 置信概率将提高。对于正态分布, 以下三个置信区间及其相应的置信概率在实验误差与数据处理中具有重要意义:

$$\begin{aligned} [\mu - \sigma_x, \mu + \sigma_x] & P = 0.6826 \\ [\mu - 2\sigma_x, \mu + 2\sigma_x] & P = 0.9545 \\ [\mu - 3\sigma_x, \mu + 3\sigma_x] & P = 0.9974 \end{aligned} \quad (0-4)$$

以上数据的含义是, 对服从正态分布的物理量进行测量时, 测量值将有 68.26% 的概率落在 $[\mu - \sigma_x, \mu + \sigma_x]$ 区间, 95.45% 的概率落在 $[\mu - 2\sigma_x, \mu + 2\sigma_x]$ 区间, 而当置信区间扩大到 $[\mu - 3\sigma_x, \mu + 3\sigma_x]$ 时, 测量值落在 $[\mu - 3\sigma_x, \mu + 3\sigma_x]$ 区间的概率达到 99.74%, 而落在该区间以外的概率不超过 0.26%, 可见 $|x - \mu| \geq 3\sigma_x$ 的可能性很小, 所以 $3\sigma_x$ 通常称为极限误差。拉依达准则简称为 $3\sigma_x$ 准则, 是最常用和最简单的判断可疑测量值的剔除准则。该准则规定, 如果某一测量值 $|x - \mu| \geq 3\sigma_x$, 则认为该 x 含有粗差, 将其剔除。

2. t 分布

根据误差理论, 当测量次数很少时 (例如, 少于 10 次), 测量列的误差分布将明显偏离正态分布, 这时测量值的随机误差将服从 t 分布 (又称学生分布)。 t 分布曲线与正态分布曲线类似, 两者的主要区别是 t 分布的峰值低于正态分布, 而且上部

较窄,下部较宽,如图 0-3 所示。这样,在有限次测量时,就要将随机误差的估算值取大一些。 t_p 称为 t 因子,其值既与测量次数 n 有关,也与置信概率 P 有关,物理实验中常用的置信概率为 0.95。

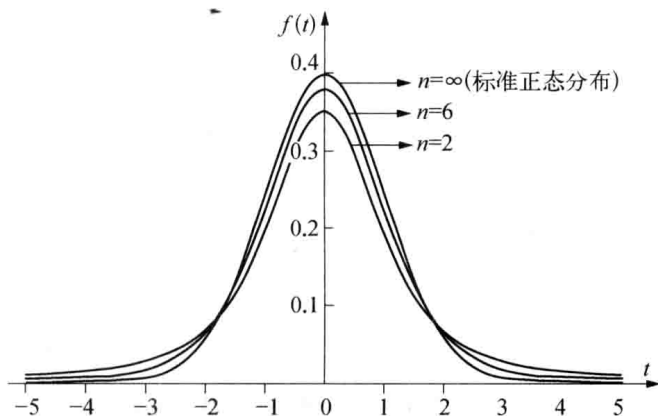
图 0-3 t 分布曲线

表 0-1 给出了 t_p 与测量次数 n 、置信概率 P 的对应关系,供查用。

表 0-1 t_p 值表

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	...	∞
$t_{0.68}$	1.84	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.03		1.00
$t_{0.95}$	12.71	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.09	...	1.96
$t_{0.99}$	63.66	9.92	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.26	2.86	...	2.58

由表 0-1 可以看出,测量次数过少, t_p 数值过大,偏离实际情况。

在实际测量中,测量次数 n 总是有限的,而且真值也不可不知。因此,标准误差 σ_x 只有理论上的价值,用实验标准差(标准偏差) S_x 近似代替标准差 σ_x 。

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (0-5)$$

每一次测量值 x_i 与平均值 \bar{x} 之差叫作残差,即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (0-6)$$

算术平均值的实验标准差为

$$S_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{n}} S_x \quad (0-7)$$

由式 0-7 可以看出,平均值的实验标准差比任何一次测量的实验标准差小。增大测量次数可提高测量精密性,但往往要付出较大的劳动,而且测量条件也难以保持不变。所以适当选择测量次数是很重要的。在一般情况下,取 $n = 6 \sim 10$ 较为适宜。

(五) 仪器误差限和灵敏阈

仪器的灵敏阈是指足以引起仪器示值可察觉到变化的被测量的最小变化量值。被测量小于这个阈值,仪器没有反应。数字仪表最末一位所代表的量,就是这个仪表的灵敏阈。对于指针类仪表,把 0.2 分度值所代表的量作为指针式仪表的灵敏阈。一般来说,仪器的灵敏阈小于示值误差限,而示值误差限应小于仪器的最小分度值。

对于初学物理实验的低年级学生,实验中一些常用的仪器误差限作如下约定:有刻度的仪器仪表,如果未标出仪器等级或精度(如米尺)取其最小分度值的一半作为仪器误差限。

标有精度的仪器仪表,取精度作为仪器误差限。如精度为 0.02 mm 的卡尺,仪器误差限为 0.02 mm。

在使用机械秒表和电子秒表时,其误差主要来源于启动和制动停表时的操作误差,仪器误差限约为 0.2 s。

常用的水银温度计,其极限误差为温度计的最小分度值。

指针式电流表和电压表的仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}} = A_m \cdot K\%$,其中, A_m 表示量程, K 为电表的准确度等级。

数字显示的仪器仪表,以显示末位的 ± 1 作为仪器误差限。

(六) 直接测量结果的表示

1. 不确定度评定

根据国家计量技术规范,参考国际标准化组织(ISO),国际纯粹与应用物理联合会(IUPAP)等七个国际组织 1993 年联合颁布的《不确定度表示指南》,测量不确定度是与测量结果相关联的参数,表征合理地赋予被测量值的分散性。测量不确定度表示的是测量结果正确性的可疑程度。不确定度的评定方法分为两类:

A 类分量 U_A : 在等精度多次测量时用统计学方法计算的分量。随机误差是最典型的 A 类分量之一。

B 类分量 U_B : 用其他方法(非统计学方法)估算出的分量。系统误差就是典型的 B 类分量之一。

物理实验教学采用一种简化的具有一定近似性的不确定度评定方法,其要点如下:

(1) U_A 由实验标准偏差 S_x 乘以因子 $\frac{t_p}{\sqrt{n}}$ 求得,即 $U_A = t_p \cdot \frac{S_x}{\sqrt{n}}$,式中 S_x 是用

贝塞尔公式 0-5 计算出的标准偏差,测量次数 n 确定后,因子 t_p 可由表 0-1 查出。

(2) 在多数直接测量中, U_B 近似取量具或仪器仪表的误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 。有时也由实验室根据具体情况近似给出。

(3) 根据不确定度的合成原则,各分量应具有相同的置信概率。两类分量用方和根法合成为总不确定度 U ,即

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = \sqrt{\left[t_p \cdot \frac{S_x}{\sqrt{n}} \right]^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (0-8)$$

(4) 测量结果应给出被测量的量值 \bar{X} ,并标出不确定度 U ,写成

$$X = (\bar{X} \pm U) \quad \text{单位} \quad (0-9)$$

它表示被测量的真值在区间 $(\bar{X} - U, \bar{X} + U)$ 内的可能性(概率)约等于或大于 95%。注意式(0-9)中的括号不可省略。

2. 测量结果的表示方法

测量结果的表示应包括测量值和不确定度两部分,并且还应注明不确定度的置信度,一般用高置信度来表示。同时还要给出相对不确定度(相对误差)的值,通常用百分数给出。两者的表达式为

$$\begin{cases} X = (\bar{X} \pm U_x) \quad \text{单位} & P = ?\% \\ E_x = \frac{U_x}{\bar{X}} \times 100\% \end{cases} \quad (0-10)$$

(七) 间接测量结果的表示及不确定度的合成

在很多实验中所进行的测量都是间接测量。间接测量的结果是由直接测量的结果根据一定的数学公式计算出来的,那么直接测量结果的不确定度就必然影响到间接测量结果,这种影响的大小可以由相应的数学公式计算出来。

设直接测量量分别为 x, y, z, \dots , 它们都是互相独立的量,其最佳估计值分别为 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots$, 相应的总不确定度分别为 U_x, U_y, U_z, \dots 。间接测量量为 Φ , Φ 与各直接测量量之间的关系可以用函数形式(或称测量式)表示:

$$\Phi = F(x, y, z, \dots) \quad (0-11)$$

间接测量量 Φ 的最佳估计值 $\Phi_{\text{最佳}}$ 可由将各直接测量量的最佳估计值带入函数关系式(0-11)得到:

$$\Phi_{\text{最佳}} = F(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) \quad (0-12)$$

Φ 值也有相应的不确定度 U_Φ 。由于不确定度都是微小的量,相当于数学

中的“增量”，因此间接测量量的不确定度计算公式与数学中的全微分公式基本相同，区别在于要用不确定度 U_x 等替代微分 dx 等，要考虑不确定度合成的统计性质。

在物理实验教学中，可以用下面公式来简化计算间接测量量的不确定度 U_Φ 。

$$U_\Phi = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 (U_x)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 (U_y)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2 (U_z)^2 + \dots} \quad (0-13)$$

式(0-13)适用于和差形式的函数及一般函数的计算，是间接测量量总不确定度的传递公式。

$$\frac{U_\Phi}{\Phi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln F}{\partial x}\right)^2 (U_x)^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial y}\right)^2 (U_y)^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial z}\right)^2 (U_z)^2 + \dots} \quad (0-14)$$

式(0-14)适用于积商形式的函数，是间接测量量的相对不确定度的传递公式。由式(0-13)和(0-14)可知，间接测量量的不确定度，不仅与各直接测量量的不确定度有关，还与传递系数有关。

应当注意，不确定度与误差是两个不同的概念，但它们彼此又是密不可分的。不确定度是建立在误差理论上的一个新概念，是对经典误差理论和评定方法的新发展。实验中的误差是不确定度的来源，而不确定度反映了误差的存在范围。从评定结果看，不确定度是以最佳估计值为中心，注重和表示测量结果本身的分散性；而误差是以真值为中心，注重和表示测量结果与被测量真值的接近程度。误差是一个难以知道、难以计算的量；但不确定度是一个可计算、可操作的量。

1. 实验数据的有效位数

在实验中所测的被测量的数值都是含有误差的，对这些数值不能任意取舍，应反映出测量值的准确度。例如，用 300 mm 长的毫米分度钢尺测量某物体的长度，正确的读法是除了确切地读出钢尺上有刻线的位数之外，还应估计一位，即读到 1/10 mm。比如，测出某物长度是 123.5 mm，这表明 123 是确切的数字，而最后的 5 是估计数字，前面的三位是准确数字，后面一位是存疑数字。又如，测出某铜环的体积为 $V \pm U_V = (16.63 \pm 0.20) \text{cm}^3$ ，这表明 16.63 的前两位是准确数字，后两位是存疑数字。准确数字和 1~2 位存疑数字的全体称为有效数字。

2. 有效位数的概念

国家标准 GB8170—87 中对有效位数的定义为：对没有小数位且以若干个零结尾的数值，从非零数字最左一位向右数得到的位数减去无效零（即仅为定位用的零）的个数，就是有效位数；对其他十进位数，从非零数字最左一位向右数而得到的位数，就是有效位数。