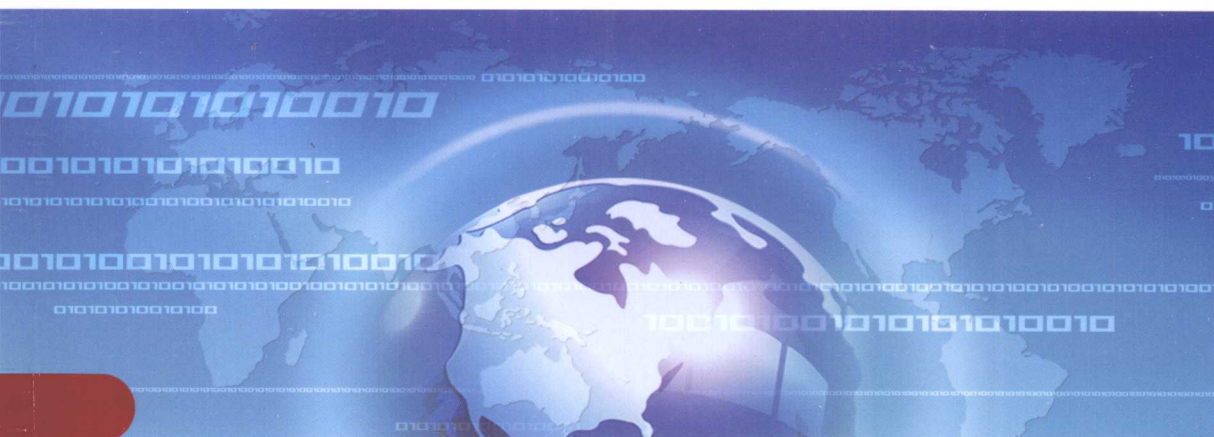




普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

主 编 秦永平 李 忠
副主编 程彦明 张志颖 白端元
主 审 桑兰芬



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

013023830

04-33
593

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

主 编 秦永平 李 忠

副主编 程彦明 张志颖 白端元

主 审 桑兰芬



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



北航

C1630754

04-33
593

内 容 提 要

本书依据教学大纲的要求,编写了26个预备、基础、综合、设计性实验。绪论部分内容主要讲解做物理实验需要具备的基础知识。26个实验题目中实验一为预备性实验,实验十三为设计性实验,实验十二为综合性实验,其余为基础性实验。

本书实验涉及到光、电部分的多一些,其他的少一些,最多可为学生开设70学时的实验,每个实验约2.5学时。

本书可作为高等院校理工类学生物理实验课程的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 秦永平, 李忠主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013.2
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-0588-9

I. ①大… II. ①秦… ②李… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第011986号

策划编辑: 石永峰 责任编辑: 李 炎 加工编辑: 郭 赏 封面设计: 李 佳

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 大学物理实验
作 者	主 编 秦永平 李 忠 副主编 程彦明 张志颖 白端元 主 审 桑兰芬
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部)、82562819 (万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市铭浩彩色印装有限公司
规 格	170mm×227mm 16开本 10.25印张 212千字
版 次	2013年2月第1版 2013年2月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	20.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

本书根据高等理工院校物理实验教学的基本要求，结合多年大学物理实验教学经验，在使用多年的实验教材基础上加以整理，充实编写而成。

在本书编写的过程中，注重对学生的基本训练，加强学生操作和问题分析能力的培养。在每个实验后面都附有相应的实验表格，让学生对实验数据的采集更有针对性和统一性。

本书中共收录编写了 26 个实验题目，其中以光学、电学方面实验为主，其他方面实验为辅，理论由浅到深，操作由简单到复杂。这 26 个实验总学时约 70 学时，主要分为四大部分：实验一为预备性实验，实验十三为设计性实验，实验十二为综合性实验，其余为基础性实验。

参加本书编写工作的有秦永平、李忠、程彦明、张志颖、白端元等同志，本书初稿的校订工作由长春理工大学的桑兰芬教授完成，且编写过程中得到长春理工大学光电信息学院教务处、基础教学部领导以及大学物理教研室全体教师的大力支持，在此表示衷心感谢。

编写本书时参考了冯秀琴主编的《大学物理实验》中的部分实验内容，以及阎一功主编的《大学物理实验》等有关书籍和文章。

由于编者水平和经验有限，有不妥之处，敬请指正。

编 者

2012 年 10 月

目 录

前言	
绪论	1
实验一 长度测量	16
实验二 物体密度的测量	25
实验三 单摆	33
实验四 用扭摆测物体的转动惯量	37
实验五 用拉伸法测量金属丝的杨氏弹性模量	42
实验六 表面张力系数的测定	48
实验七 固体线膨胀系数的测定	53
实验八 欧姆定律的应用	58
实验九 伏安特性曲线	64
实验十 示波器的调整与使用	68
实验十一 用示波器测音叉频率	77
实验十二 直流单臂电桥	78
实验十三 电位差计的应用	82
实验十四 用模拟法测绘静电场	87
实验十五 密立根油滴实验	91
实验十六 透镜成像规律及焦距测量	97
实验十七 用牛顿环测球面的曲率半径与用劈尖测量微小厚度	103
实验十八 利用双棱镜测定光波波长	109
实验十九 分光计的调整及使用	114
实验二十 光栅的衍射	123
实验二十一 迈克尔逊干涉仪的调整与使用	127
实验二十二 用阿贝折射仪测固体、液体的折射率	134
实验二十三 白光全息摄影	139
实验二十四 普朗克常数的测量	142
实验二十五 用磁阻传感器法描绘磁场分布	147
实验二十六 螺线管磁场的测量	153

绪 论

0.1 引言

物理学是一门实验科学。实验就是用人为的方法让自然再现,从而加以观察和研究。实验是人们认识自然、改造客观世界的基本手段。物理学新概念的确立和新规律的发现要依赖于反复实践。物理学上新的突破常常是通过新的实验技术的发展,从而促进科学技术的革命,形成新的生产力。物理实验是科学理论的源泉,是工程技术的基础。物理实验的方法、思想、仪器和技术已经被普遍地应用在各种科学领域和技术部门。实验是理论应用的桥梁,任何一门科学的发展都离不开实验,著名物理学家杨振宁曾经说过:“物理学是以实验为本的科学”。这充分说明物理实验的重要性。

物理实验课是对学生进行实验教育的入门课,在学习物理实验基础知识的同时,着重培养学生初步的实验能力、良好的实验习惯和严格的科学作风。大学物理实验课是高等工科院校一门必修的基础课程。

实验课虽然是在教师指导下的学习环节,但在实验课上学生的活动有较大的独立性,可以充分地调动学生的学习积极性,充分发挥学生的想象力和创造力,实验课为培养实用型人才打下良好的基础。

大学物理实验课使学生接受一系列科学实验训练,学习物理实验知识及基本方法;了解科学实验的主要过程与基本技能;学会用实验的方法研究和解决问题。

大学物理实验课其主要任务有:

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,加深对物理学原理的理解。

(2) 注重培养学生的基本技能。

自学能力:能够自行阅读教材和有关的资料,做好实验前的预习。

动手能力:能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器,按线路图正确连接线路,实验完毕按顺序整理好仪器。

分析解决问题的能力:能够运用所学的理论对实验中出现的现象进行初步的分析判断,对于正确的加以肯定并继续进行,对于错误的找出原因并考虑解决问题的方法。

表达能力:能够正确记录和处理实验数据、绘制曲线、说明实验结果以及写出合格的实验报告。

设计能力:能够完成简单的设计性实验。

(3) 使学生在运用所学的理论知识、实验方法和实验技能解决具体问题方面

得到必要的基本的训练。

大学物理实验课分三个主要阶段：课前预习、课堂操作、课后实验数据的处理。

1. 实验课前的预习

实验课前必须认真阅读教材中的有关实验题目，了解本次实验的目的和内容、依据的基本原理、使用的仪器设备、操作的基本方法和注意事项，要测量哪些量，怎样测量，具体步骤是什么，并写好预习报告。

写预习报告时要用统一规格的实验报告纸，其主要内容如下：

- ①实验名称；②实验目的；③使用的主要仪器和设备；④实验原理及原理图；⑤实验的主要内容、步骤及注意事项；⑥画好数据记录表格。

2. 进行实验

(1) 进入实验室要保持安静，不要乱动仪器。教师对学生的预习情况进行检查，并对一些普遍性、关键性的问题和同学共同讨论，以便顺利进行实验。

(2) 须经教师许可后方可调试安装仪器，电学实验未经教师检查线路不得接通电源，以免因接错电路而造成仪器的损坏。

(3) 认真进行实验，测量得到的数据直接记录到数据表格内，不得随意涂改。

(4) 测量完毕，须经教师检查数据和仪器，签字后方可拆除实验装置，并将仪器恢复原位后再离开实验室。

3. 处理实验数据，总结实验结果

实验课结束后，根据实验要求完成实验数据的处理。在计算间接测量量时，必须先写出计算公式，再代入数值，最后得到结果并注明单位。实验报告是实验工作的全面总结，要用简明的形式将实验结果完整而又真实地表达出来。写报告时，要求文字通顺，字迹端正工整，图表规范，结果正确，讨论认真。

0.2 测量

进行物理实验除了要观察实验现象以外，还要对某些物理量进行定量测量。所谓测量就是将待测的物理量与相应的同类标准计量单位进行比较，其倍数即为测量值，连同计量单位构成测量结果。例如：用米尺测量单摆的摆长，经比较得到摆长是1米的1.074倍，1.074是测得值，米是单位，合起来构成测量结果，即摆长为1.074米。

- 根据测量方法，测量可分为直接测量、间接测量和组合测量。

(1) 直接测量就是指可以用仪器、仪表直接测得被测量数值的测量，例如：用游标卡尺测圆形物体的直径；用物理天平称量物体的质量；用电压表测电压等。

(2) 间接测量是指通过直接测量借助函数关系计算出待测量数值的测量。例如：待测量为物体的密度，需测量出物体的质量 m 和体积 V ，由密度公式 $\rho = m/V$ 算出物体密度，这种测量就是间接测量。

(3) 组合测量是指为了找出两个物理量之间在某一区间的函数关系，而在该

区间对这两个量进行的逐点测量。如某元件的伏安特性,是通过在一定范围内,测量不同电压 V 下所产生的电流 I 而得出的。

● 根据测量条件变化与否,可把测量分成等精度测量和不等精度测量。

(1) 等精度测量是指在测量条件相同的情况下进行的一系列测量,即同一个人在同样的环境条件下在同一仪器上,采用同样的测量方法对同一物理量进行的多次测量。

(2) 不等精度测量是指对同一物理量进行多次测量时改变测量条件,如更换仪器型号、改变测量方法、更换测量人员等,在测量条件变更前后,测量结果的可靠程度不等,这样的测量叫不等精度测量。

测量仪器是指用以直接或间接测出被测对象量值的所有器具,如电压表、天平、电位差计、惠斯登电桥、照度计等。

测量结果给出被测量的量值,包括数值和单位两部分,实际上仪器在测量中是单位的实体现。

一个国家最准确的计量器具是一些主基准,在全国各地则有由主基准校准过的工作基准,实验室使用的仪器已直接或间接由工作基准进行过校准。

测量是以仪器为标准进行比较,所以要求仪器准确。仪器的准确程度由仪器准确度等级来描述。由于测量目的的不同,对仪器准确程度的要求也不同,例如:称量金饰品的天平必须准确到 0.001g ,而卖货的台称差几克则无关紧要。为了适应各种测量对仪器的准确程度的不同要求,国家规定工厂生产的仪器分为若干准确度等级,各类各等级的仪器又有对准确度的具体规定,例如,2级螺旋测微计测量范围大于 10mm 且小于 50mm 的最大误差不超过 $\pm 0.013\text{mm}$,1.0级的电流表测量范围为 50mA 的最大误差不超过 $\pm 0.5\text{mA}$ 。

实验时要恰当选取仪器,仪器选取不当对仪器和实验均不利。表示仪器的性能有许多指标,最基本的是测量范围和准确度等级。当被测量超过仪器的测量范围时,首先会对仪器造成损伤,其次可能会测不出量值(如电流表、电压表)或勉强测出量值(如天平)但误差增大。对仪器的准确度等级的选择也要适当,一般是在满足测量要求的条件下,尽量选用准确度低的仪器,减少准确度高的仪器的使用次数,可以减少在反复使用时的损耗,以便延长使用寿命。

0.3 真值和误差

1. 测量与误差

每一个物理量都是客观地存在着,在一定条件下有其不依人的意志而变化的固定大小,这个客观存在的固定大小的值叫真值。由于测量总是依据一定的理论或方法,使用一定的仪器,由一定的人进行,由于理论的近似性,仪器的灵敏度及环境因素的影响,使得测量值与真值之间总存在着差异,测量值 x 与真值 x_0 的差为测得值的绝对误差 ε ,即:

$$\text{测量值}(x) - \text{真值}(x_0) = \text{绝对误差}(\Delta x) \quad (0-3-1)$$

绝对误差 Δx 是一个代数值, 当 $x \geq x_0$ 时, $\Delta x \geq 0$; 当 $x < x_0$ 时, $\Delta x < 0$, 由于客观条件、人的认识的局限性, 测量不可能获得待测量的真值。因此实际测量中常用被测量经修正过的算术平均值来代替真值。设某物理量真值为 x_0 , 进行 n 次等精度测量, 测量值分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 、 $\cdots$ 、 x_n , 它们的误差为

$$\Delta x_1 = x_1 - x_0$$

$$\Delta x_2 = x_2 - x_0$$

$\cdots$

$$\Delta x_n = x_n - x_0$$

求和后

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = \sum_{i=1}^n x_i - nx_0 \quad (0-3-2)$$

其算术平均值

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - x_0 \quad (0-3-3)$$

当测量次数 $n \rightarrow \infty$, 可以证明 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \rightarrow 0$, 而且 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x}$ 是 x_0 的最佳估计值。亦称 $\bar{x}$ 为近真值。测量值与近真值的差值为偏差, 即 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ 。

评价一个测量结果的准确程度不仅要看绝对误差的绝对大小, 还要看它与测量值的相对比例。绝对误差与真值之比的百分数叫相对误差。用 E 表示:

$$E = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (0-3-4)$$

由于客观条件所限, 不可能测得待测量的真值, 只能得到近似值。所以在计算相对误差时常用 $\bar{x}$ 来代替 x_0 。 $\bar{x}$ 可能是公认值, 或高一级精密仪器的测量值, 或测量值的平均值。相对误差用来表示测量的相对精度。

由于真值是不确知的, 所以测量值的误差也是不确知的。在此情况下, 测量的任务是:

- (1) 给出被测量的最佳估计值。
- (2) 给出真值的最佳估计值的可靠程度的估计。

为了减少或消除某些误差, 就要充分地认识产生各种误差可能的一些来源以及表现出来的性质, 因此有必要对误差进行分类, 通常把误差分为系统误差、随机误差和粗大误差。因粗大误差明显地偏离测量结果, 容易被发现, 以下主要讨论系统误差和随机误差。

2. 系统误差

系统误差的主要特征是具有确定性。在同一条件下进行多次测量时, 误差的大小、正负保持不变或在条件改变时, 误差的大小和方向按一定规律变化。

系统误差的来源可概括为以下四个方面:

- (1) 仪器误差: 由于测量仪器或工具本身的缺陷所产生的误差, 例如: 天平

不等臂带来的误差。

(2) 理论、方法误差：由于实验条件达不到规定的要求或测量方法不够完善，理论、方法的近似而导致的误差，如单摆的周期公式为 $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ ，其使用条件要求摆角足够小，忽略了摆角的影响而产生的误差。

(3) 环境影响产生的误差：周围环境的变化（如温度、压强、湿度、电磁场等因素的变化）影响测量量而产生的误差。

(4) 个人误差：观测人员的心理或生理特点所造成的误差，如计时的超前或落后，读表时的偏左或偏右等。

发现和减少系统误差的方法主要有以下三种：

(1) 主要分析仪器的示值误差、零值误差、调整误差、回程误差等，其中回程误差是指在相同条件下，仪器正、反行程在同一点上测量值之差的绝对值。

(2) 理论分析：从实验装置、实验条件与理论条件是否一致去发现系统误差，例如用伏安法测电阻时，不论是内接法还是外接法均与理论约定不相符，但可以通过理论分析进行修正。

(3) 对比实验：改变实验部分条件甚至全部重新测量，分析改变前后的测量值是否有显著不同，从中分析有无系统误差。

系统误差的处理方法：

(1) 对换法：将测量中的某些因素相互交换，造成某项系统误差的正负号发生变化。例如用电桥测电阻时，交换待测电阻与标准电阻的位置可以消除接触电阻造成的误差。

(2) 补偿法：如在热学实验中，在升温和降温条件下对温度测量各进行一次，两次测量的平均值可以抵消由于测量值比实际温度滞后带来的系统误差。

(3) 替代法：在一定条件下，用一已知量替代被测量以消除系统误差。

(4) 异号法：使系统误差在测量中出现两次，两次的符号恰好相反，取两次测量的平均值作为测量结果即可将系统误差消除。

3. 随机误差

随机误差的特点是在同一条件下，对同一物理量进行重复测量时，各次测量值的误差一般不完全相同，而且没有一定的规律。随机误差是由偶然的不确定的因素造成的。

由于随机误差产生的原因很多，又无法估计，因此无法消除，但并非没有规律可循，当对物理量进行多次测量时，随机误差呈现一定的规律性。例如：用手控制数字毫秒计，多次测量单摆的周期，将测得值分布的区域等分为八个区间，统计各区间内测得值的个数 N_i ，以测量值 T 为横坐标， N_i/N 为纵坐标（ N 为总次数）作统计直方图，图 0-1 是某次实验结果。

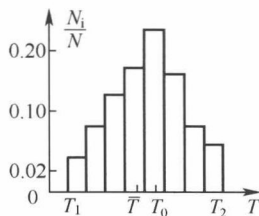


图 0-1 统计直方图

$T_1=1.749\text{s}$ 为最小值, $T_2=1.968\text{s}$ 为最大值, $\bar{T}=1.8594$ 为平均值, 从图 0-1 中可以看出, 比较多的测量值集中在分布区域的中部, 而区域的左右两半的测得值都接近一半, 由此可以设想被测量值的真值就在数据比较集中的部分。

在上述测量之后, 我们再用光电门控制一台数字毫秒计去测同一个摆的周期, 测 N 次, 测得值分布在 1.863s 到 1.865s 的小区域内, 由于此时的随机误差显著小于前者, 可将光电控制测得的平均值 T_0 作为手控制测量量的近似真值, 对于测量值的随机误差作如下统计, 取 $T_0=1.8640\text{s}$ 。

$$T_i - T_0 < 0 \quad \text{占 } 49\%$$

$$T_i - T_0 \geq 0 \quad \text{占 } 51\%$$

$$T_0 \text{ 左右全区 } \frac{2}{5} \text{ 范围内} \quad \text{占 } 67\%$$

多次测量均有同上相似的结果, 因而得出如下几点认识: 每次测量的随机误差是不确定的; 出现正号或负号偶然误差的机会相近; 出现绝对值小的偶然误差的机会多一些; 超过某一限度的误差实际上不会出现。理论与实践都证明: 在多数情况下, 随机误差服从正态分布 (即高斯分布) 规律。

根据误差理论, 随机误差的正态分布函数为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (0-3-5)$$

$$\delta = \Delta x = x - x_0 \quad (0-3-6)$$

式中 x 表示测量值, x_0 表示真值, δ 为测量值的随机误差, σ 是与真值 x_0 有关的常数, 我们把 σ 称为标准偏差。正态分布函数 $f(\delta)$ 的曲线如图 0-2 所示, 曲线下面面积为 1, 代表各种测量误差出现的总概率。 $\Delta\delta$ 区间的面积为 $f(\delta)$, $\Delta\delta$ 表示测量值的误差出现在 $\delta \sim \delta + \Delta\delta$ 范围内的几率。服从正态分布规律的随机误差有以下特征:

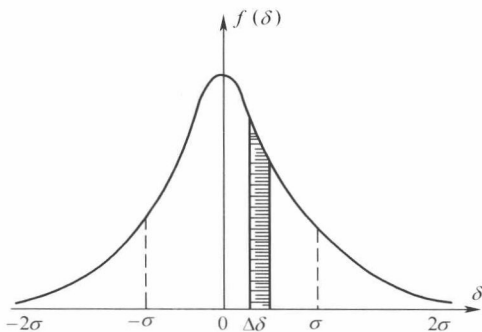


图 0-2 正态分布函数曲线

(1) 单峰性: 绝对值小的误差出现的几率大, 绝对值大的误差出现的几率小。

(2) 对称性：大小相等的正、负误差出现的几率均等。

(3) 有界性：非常大的正、负误差出现的几率为零。

(4) 抵偿性：当测量次数非常多时，正、负误差相互抵消，所以误差的代数和趋于零。

由图 0-3 可知：标准误差 σ 反映了测量值的离散程度。随机误差正态分布曲线的形状取决于 σ 值。 σ 值越小，分布曲线越陡，峰值越高，则测量值的重复性越好；反之， σ 值越大，曲线越平坦，峰值越低，说明测量值的重复性差。

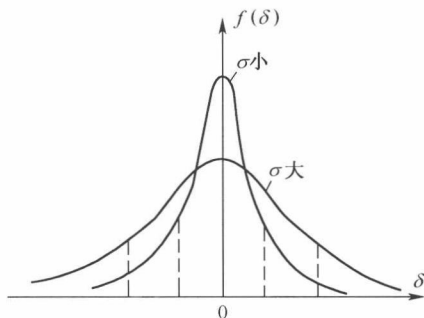


图 0-3

随机误差的估算：

设在一组测量值中， n 次测量的观测值分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 、……、 x_n ，根据最小二乘法原理证明，多次测量的算术平均值 $\bar{x}$ 为：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (0-3-7)$$

式中 $\bar{x}$ 是待测量真值 x_0 的最佳估计值，称为近真值，我们将用 $\bar{x}$ 表示多次测量的近似真实值。

4. 标准偏差 S_x

实际测量中测量次数有限，被测量真值未知，标准误差无法计算。可以证明，标准误差的最佳估计值为：

$$S_x = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{贝塞尔公式}) \quad (0-3-8)$$

平均值的标准偏差 $\sigma_{\bar{x}}$ 为：

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (0-3-9)$$

0.4 不确定度，测量结果的表示方法

1. 不确定度

不确定度的意义：一个完整的测量结果不仅要给出该测量值的大小和单位，同时还应给出它的不确定度。

测量不可能没有误差，而误差又是未知的理想概念，为了准确地将测量结果的可信赖程度表示出来，就需要有个易于做出、易于理解、易于接受的统一的评定和表示方法。不确定度是说明测量结果的一个参数，它表示误差可能存在的范围，它的大小可以按一定的方法计算（或估计）出来。不确定度是对被测量的真值所处量值范围的一个评定；不确定度也是未知的误差可能大小的反映，同时也反映测量结果的可信赖程度，同时不确定度的大小也反映了测量结果质量的好坏程度。

(1) 不确定度的分类。

通常，测量不确定度由几个分量构成。将可修正的系统误差进行修正后，根据获得的方法的不同，划分为 A 类不确定度分量和 B 类不确定度分量。

● A 类不确定度的定义和评定

A 类不确定度是指对重复测量并使用统计方法算得的不确定度，如测量读数具有分散性，这类不确定度被认为是服从正态分布规律的，因此可以像计算标准偏差那样，用贝塞尔公式计算被测量的 A 类不确定度，用 S_i 来表示，即多次测量的某次测量的 A 类不确定度为贝塞尔公式：

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (0-4-1)$$

最佳值 $\bar{x}$ 的 A 类不确定度为：

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (0-4-2)$$

● B 类不确定度的定义和评定

B 类不确定度的定义和评定是指用非统计方法求出或评定的不确定度的分量，用 u_j 来表示。 u_j 的大小用估计的方法来评定，但这种估计不是无根据的随意估计，B 类不确定度是根据以前的测量数据、有关材料、仪器特点及性能等有关知识，根据制造说明书、检定书或其他证书提供的数据以及使用手册提供的参考数据等信息进行合理地综合估计。

B 类不确定度的确定首先是指影响测量的诸多因素，常见的主要因素有计量仪器、实验装置、环境和实验者等，再进一步对这些因素引起的效应逐一地作出不确定的估计，一般由极限误差估计值 Δ 除以一个常数 c 得到，即：

$$u_j = \frac{\Delta}{c} \quad (0-4-3)$$

若认为该项极限误差的来源属于正态分布, 则 $c=3$ 。若认为属于均匀分布则 $c=\sqrt{3}$ 。在物理实验中, 测量值的偶然误差的分布形式常见的有两种, 即正态分布和均匀分布。视值误差一般为正态分布, $c=3$, 数字仪表的读数显示、度盘或其他传动齿轮的回差以及游标尺的读数都近似遵从均匀分布, 即 $c=\sqrt{3}$, 若误差来源属性不清, 可假设遵从正态分布, 即 $c=3$ 。

注: A 类和 B 类不确定度的分类, 其目的是指明不确定度两分量的不同评定方法, 并不意味两分量本身性质上存在什么差别。“A 类”和“B 类”并不代表“偶然误差”和“系统误差”, “误差”和“不确定度”两术语不同义, 概念也不相同, 两者不能混淆和误用。

(2) 不确定度的合成。

用以表征某一直接测量结果的可靠程度的总的不确定度叫合成不确定度, 用 u_c 表示, 它是由 A 类不确定度 $\sum_i s_i^2$ 和 B 类不确定度 $\sum_j u_j^2$ 的方和根构成, 即

$$u_c = \sqrt{\sum_i s_i^2 + \sum_j u_j^2} \quad (0-4-4)$$

2. 测量结果的表示方法

最佳值代替真值表示测量值:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

用不确定度 $u_{c(x)}$ 来表征测量结果的可依赖程度:

$$u_c = \sqrt{\sum_i s_i^2 + \sum_j u_j^2}$$

测量结果的表达式为:

$$x = \bar{x} \pm u_c$$

$$E = \frac{u_c}{\bar{x}} \times 100\%$$

其中 E 为相对不确定度。

0.5 有效数字

测量不可能得到被测量的真实值, 实验数据的记录只是反映了近似值的大小, 任何物理量其测量结果都包含误差, 因此测量数据应反映测量的准确度, 故对数据的记录、运算以及结果的位数有严格的要求。有效数字是测量结果的一种表示, 它应当是有意义的数码, 不应允许无意义的数字存在。有效数字应根据测量误差

或实验结果的不确定度确定,决不能任意取舍。在实验的过程中对测量值进行读数应取几位、处理实验数据时运算后应留几位,这是实验数据处理的重要问题。实验时处理的数值应是能反映出被测量的实际大小的数值,即记录与运算后保留的数字应为能传递出被测量实际大小信息的全部数字,下面就此问题进行讨论。

1. 仪器的读数、记录与有效数字

我们把测量结果中可靠的几位数字加上有误差的一位数字称为有效数字。一般地讲,仪器上显示的数字均为可靠数字,仪器上最后一位估读的数字应视为可疑数字,它们都是有效数字,应读出并记录。例如:用一最小分度为毫米的刻度尺测得一物体的长度为 1.36cm ,其中1和3是准确读出的数字,最后一位数字即小数点后的第二位6是估读出来的,仪器本身也将在这一位上出现误差,所以它存在一定的可疑成分,即实际上这一位可能不是6,虽然6这个数字并不十分准确,但是近似地反映出这一位大小的信息,所以还应算作有效数字。

如果仪器上最后一位显示的数字是“0”时,此时“0”也是有效数字,也要读出来并记录。例如,用最小分度为一毫米的刻度尺测得一物体的长度为 2.30cm ,它表示物体的末端是和分度线“3”刚好对齐,下一位是0,此时若写成 2.3cm ,则不恰当,因为“3”是准确的,“0”这位是可疑位,也应算作有效数字,必须记录。另外在记录时,由于选择单位的不同,也会出现一些“0”,如 2.30cm 可以写成 0.0230m 或 $23000\mu\text{m}$,这些由于单位变换才出现的“0”,没有反映出被测量大小的信息,不能认为是有效数字。因此在物理实验中常用被称为标准式的写法,就是任何数值都只写出有效数字,而数量级则用10的幂数表示,上述两例应写为 $2.30\times 10^{-2}\text{m}$ 、 $2.30\times 10^4\mu\text{m}$ 。

有效数字的位数与小数点的位置无关,如2.14和21.4都是三位有效数字。关于“0”是否是有效数字可根据下列条件进行判断:从左至右,以第一个不为“0”的数字为标准,其左边的“0”不是有效数字,其右边的“0”是有效数字,例如: 0.00336 是三位有效数字, 0.003360 是四位有效数字。即当“0”表示小数点位置时它不是有效数字;反之,则是有效数字。作为有效数字的“0”不可省略。例如: 2.340 不可写作 2.34 ,它们所表示的准确程度不同,前者比后者准确度高。

对于分度式仪表,读数要读到最小分度的十分之一。例如,最小分度是毫米的刻度尺,测量时一定要估测到十分之一毫米那一位;最小分度是 0.1A 的安培计,测量时一定要估测到百分之一安培那一位。但有的指针式仪表的分度较窄,而指针较宽(大于最小分度的五分之一),这时要读到最小分度的十分之一有困难,可以读到最小分度的五分之一甚至二分之一。

一个测量结果的有效数字的多与少反映了该测量的准确程度,有效数字与小数点的位置无关,也与单位选择无关。

2. 有效数字的记录方法

- (1) 每个直接测量量的有效数字,其最后那位应该是最小分度值的估读数字。
- (2) 任何测量结果都只写出有效数字,数量级用10的幂表示。

(3) 可疑数字只取一位, 但有时取两位。运算中可多留一位有效数字。

3. 有效数字的运算规则

如果实验数据不计算不确定度时, 测量结果的有效数字可按以下规则确定:

(1) 加减运算后的有效数字的可疑位应当和参加运算各数中最先出现的可疑位一致。

【例】

$$\begin{array}{r} 541.2\bar{7} \\ 10.\bar{3} \\ + \quad 7.36\bar{5} \\ \hline 558.9\bar{3}\bar{5} \end{array}$$

(上式中, 数字上有横线的数字均为可疑数字), 其计算结果应写为 558.9。

(2) 乘除运算后的有效数字的位数应与参加运算各数中有效数字位数最少的一致。

【例】 $325.78 \times 0.0145 \div 789.2 = 0.00599$

有效数字位数最少的是 0.0145, 其有效数字位数为三位, 所以计算结果应取三位有效数字。

(3) 乘方、开方运算的有效位数与其底数有效位数相同。

(4) 自然数 1、2、3、… 不是通过测量而获得的, 所以不存在可疑, 因此可视自然数的有效位数为无穷多。

(5) 无理常数如 $\sqrt{2}$ 、 $\sqrt{3}$ 、 π … 的有效位数也可以看作是无穷多位, 计算过程中当这些常数参加运算时, 这些常数应取的有效位数应比测量数据中有效位数最少者多取一位。例如: $S = \pi R^2$, 测量值 $R = 2.50 \times 10^{-1} \text{m}$, 那么 π 应取为 3.142, 则 $S = 3.142 \times (2.50 \times 10^{-1})^2 = 1.96 \times 10^{-1} \text{m}^2$ 。

4. 有效数字的取舍原则

运算后的数值只保留有效数字, 其他数字应舍去, 要舍弃的数字的第一位应按如下规则处理: 余部大于 5 则入, 小于 5 则舍, 等于 5 凑偶。

【例】7.645750

取两位有效数字为 7.6 (余部小于 5);

取三位有效数字为 7.65 (余部大于 5);

取五位有效数字为 7.6458 (余部等于 5);

7.645850 取五位有效数字也为 7.6458。

5. 使用有效数字运算规则时应注意的问题

(1) 对数运算时, 首数不算有效数字。

(2) 在乘除运算时中计算有效数字位数时, 当首位是 8 或 9 可多留一位。

【例】 $9.81 \times 16.24 = 159.3$

9.81 是三位有效数字, 结果应取 159, 但因为 9.81 首位是 9, 可将 9.81 算作四位数, 所以结果取 159.3。

(3) 对于计算过程的中间数据, 应比近似计算规则所要求的多保留一位存疑数字, 计算最后结果时, 再按照要求取一位存疑数字, 以减小因多次数字的取舍而产生的附加误差。

0.6 实验数据处理方法

实验数据的处理是指把从实验获得的数据通过整理、计算、分析等严格的处理方法把事物内在规律性提取出来, 实验数据的处理是实验工作不可缺少的重要部分。下面介绍几种处理实验数据的常用方法。

1. 列表法

在实验过程中我们记录和处理数据时常常将实验数据列成表格, 尤其是在实验数据比较多时, 更宜于用列表法处理数据。这种方法的优点是可使大量的数据表达清晰明了, 避免混乱, 避免丢失数据, 易于检查数据, 避免错误, 有助于反映出物理量之间的关系。数据列表要求表格设计合理, 简单明了, 根据需要可把计算的中间项列出来, 一些相关量、对应量都可按一定的形式和顺序列出相应栏目, 这样就可简单明确地表示出相关的物理量之间的对应关系。同时避免不必要的重复计算。

列表要注意完整, 写明表格与栏目的名称, 单位与公因子写在标称栏内, 不得重复写在各数据中。每测完一个数据后, 要用钢笔或圆珠笔直接填入数据表格内, 要根据仪表的最小刻度所决定的实验数据的有效数字认真填写, 各数据之间不要太拥挤, 应留有间隙, 以供必要时补充和修改。测得的原始数据填入数据表格后不得随意更改, 若发现数据有错误, 可在错误的数据上画一条整齐的直线, 在附近重新写上正确的, 且需注明错误原因。

2. 作图法

作图法就是在坐标纸上把各实验数据之间的关系和变化用图线表示出来。作图法是了解物理量间的函数关系, 找出经验公式的最常用方法之一, 能够处理数据, 反映物理量之间的关系, 这是作图法处理数据的突出优点。由于图线是依据点作出的, 所以作图具有多次测量取平均的作用。利用作图法可以从图纸中求出某些物理量或常数, 也可直接从图中读出没有进行观测的对应于 x 的 y 值, “内插法”和“外延法”就是从所作的图纸上或延长线上读坐标的方法。

作图的基本规则如下:

(1) 当决定了参量以后, 根据具体情况选用毫米方格的直角坐标纸、对数坐标纸等。其坐标纸大小及坐标分度的比例要根据测量数据的有效数字位数和结果的需要来确定, 原则是: 测量数据中的可靠数字在图中应为可靠的, 测量数据中的可疑数字在图中应是估计的, 即坐标中的最小格对应测量有效数字中可靠数字的最后一位。

(2) 坐标轴的坐标与比例。通常以坐标横轴代表自变量, 纵轴代表因变量,