



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理实验

张奕林 王怡 金恩姬 郭立群 高德文 等编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理实验

张奕林 王怡 金恩姬 郭立群 高德文 等编

中国石化出版社

地址：北京市东城区安民门大街28号

邮编：100011 电话：(010)84321850

传真：(010)84329274

http://www.sinopec-pub.com

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京市东城区安民门大街28号

中国石化出版社

787×1092毫米 1/32开本 14.22印张 380千字

2008年3月第1版 2008年3月第1次印刷

58.00元

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是在吸收多年来物理实验教学改革经验的基础上,根据教育部制定的《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求(正式报告稿)》编写的。全书内容包括:误差、不确定度和有效数字的概念,各种物理仪器的基本知识以及基础性实验、综合性和近代物理实验、设计性实验等内容。本书的特点是:精选基础性实验,大幅度增加综合性实验和设计性实验,并把激光技术、传感技术和计算机技术等现代应用技术引入了物理实验。

本书可作为普通高等院校理工科非物理专业本科生教材,也可作为相关技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/张奕林等编. —北京:中国石化出版社,2008
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-80229-490-5

I. 大… II. 张… III. 物理学-实验-高等学校-教材
IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 013290 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京密云红光制版公司排版

北京宏伟双华印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 11.25 印张 280 千字

2008 年 3 月第 1 版 2008 年 3 月第 1 次印刷

定价:22.00 元

前 言

本教材是在《物理实验教程》、《大学物理实验学习指导书》、《近代物理实验讲义》、《大学物理实验讲义》和《物理实验网上预习指导书》等讲义的基础上编写而成的，融入了多年来不断开展物理实验教学改革的成果，是物理教师和实验技术人员十几年从事物理实验教学辛勤劳动的结晶。

本教材的编写宗旨是全面贯彻落实“非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求”。教学内容方面，在精选基础实验，加强基本方法、基本技能训练的同时，增加综合性实验和近代物理实验的数目，并把激光技术、传感技术和计算机技术等现代物理技术引入了物理实验。能力培养方面，一是综合性实验和近代物理实验巩固了学生基础性实验的学习成果，开阔了学生的眼界和思路，提高了综合运用各种实验方法和实验技能的能力；二是开设了设计性实验，学生根据实验题目的难度，组成一人或两人小组，自己设计实验方案并独立完成实验全过程，培养了创新能力、独立操作能力和团队合作精神。教学模式和教学方法方面，自行开发并使用了“物理实验计算机网络预习与选课系统”和“物理实验电子课件”，广大学生在校园网上选课、预习、查询课程安排和实验成绩，老师通过网络录入实验成绩，为学生答疑解惑，使物理实验教学实现了全面开放。

参加该教材编写的人员有：张奕林(第一章、第二章第一节和第三节、实验五、实验二十一、实验二十三、实验二十五、实验三十六)，王怡(实验十三、实验二十九、实验二十二、实验三十)，金恩姬(实验一、实验十二、实验二十六、实验三十三、实验三十四、实验三十五)，郭立群(实验六、实验十六、实验十七、实验三十一、实验三十七)，高德文(实验七、实验十四、实验二十)，易智勇(实验八、实验九、实验三十二)，于春娜(实验四、实验十、实验十五、实验二十八)，赵曼(实验十一、实验十九)，李东临(实验二十七)，吕爱君(实验二、实验三)，谭恩忠(实验十八、实验三十八)，朴星亮(实验二十四)，冯升同(第二章第二节)；张奕林、王怡、金恩姬、郭立群、高德文对所有稿件进行了初审；赵昶编制了各种附表；最后由张奕林进行统稿、修改。

清华大学张连芳教授和北京大学吕斯骅教授在百忙中审阅了全书，并提出了非常宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢！

在本书的编写过程中，始终得到了有关领导和同事们热情的关心与帮助，也得到了中国石化出版社同志的细心指导，借此表达真挚的谢意。

由于编者水平有限，书中难免有缺点和错误，恳请广大师生批评、指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 大学物理实验课程简介	(1)
第二节 测量误差和不确定度	(3)
第三节 有效数字和数据处理	(9)
第二章 预备知识	(16)
第一节 物理实验仪器基本知识	(16)
第二节 “物理实验计算机网络预习与选课系统”简介	(23)
第三节 设计性实验和综合性实验简介	(26)
第三章 基础性实验	(27)
实验一 落球法测定液体的黏滞系数	(27)
实验二 用扭摆法测定物体的转动惯量	(29)
实验三 气体比热容比 C_p/C_v 的测定	(35)
实验四 电表改装及校准	(38)
实验五 惠斯通电桥测电阻	(43)
实验六 示波器的原理和使用	(49)
实验七 用模拟法研究静电场	(54)
实验八 灵敏电流计的研究	(57)
实验九 用冲击电流计测螺线管轴线上的磁感应强度	(61)
实验十 电位差计	(68)
实验十一 分光计的调节和固体折射率的测定	(73)
实验十二 等厚干涉——牛顿环、劈尖	(78)
实验十三 用衍射光栅测量单色光的波长	(82)
第四章 综合性实验和近代物理实验	(85)
实验十四 伏安法测电阻	(85)
实验十五 弯梁法测定杨氏模量	(90)
实验十六 RLC 电路稳态特性的研究	(96)
实验十七 迈克尔逊干涉仪的调整与使用	(100)
实验十八 霍耳效应法测量磁场	(106)
实验十九 偏振光的研究	(112)
实验二十 密立根油滴法测定电子电荷	(118)
实验二十一 光电效应法测定普朗克常数	(123)
实验二十二 塞曼效应	(127)
实验二十三 光栅单色仪的校准与使用	(134)
实验二十四 光敏探测器的研究	(138)
实验二十五 微波光学实验	(140)
实验二十六 夫兰克 - 赫兹实验	(144)

实验二十七 动态法测定金属的杨氏模量	(150)
实验二十八 全息照相的观察和摄制	(155)
第五章 设计性实验	(161)
实验二十九 金属线胀系数的测定	(161)
实验三十 密度的测定	(161)
实验三十一 万用表的设计	(162)
实验三十二 非平衡电桥的应用	(163)
实验三十三 冲击电流计测电容	(163)
实验三十四 低电阻的测定	(164)
实验三十五 光的衍射	(164)
实验三十六 固体、液体折射率的测量	(165)
实验三十七 RC 及 RLC 电路暂态特性的研究	(166)
实验三十八 声速的测定	(166)
附表	(168)
参考文献	(173)

第一章 绪 论

第一节 大学物理实验课程简介

一、大学物理实验课程的特点和内容

大学物理实验课是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练必修的通识课程,是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端。

大学物理实验与中学物理实验既有衔接又有不同。“不同”首先体现在课程设置上,“大学物理实验”是一门独立的课程,有单独的教学大纲、教学体系和考核方法,而中学物理实验只是物理课的一部分,不是独立课程;其次体现在教学目的上,“大学物理实验”是以让学生受到实验方法和实验技能的系统训练为教学目的,中学物理实验是以加深对物理课讲的概念和规律的理解为教学目的;还有,中学物理实验以观察实验现象为主,学生动手机会不多,大学物理实验都需要测量数据,动手机会相当多;中学物理实验集中在力学和电磁学方面,实验数量不多,大学物理实验覆盖面广,除了力学、电磁学实验以外,还有光学、近代物理实验等;中学物理实验仪器也无法和大学物理实验仪器相比。所以,千万不要以为大学物理实验和中学物理实验差不多,如果一开始时就不重视,学习就会陷入被动状态。

物理实验的第一个特点是实践性强,物理实验除了需要理论知识以外,还需要一定的物质条件,如实验的环境、所用仪器等,此外,如果没有人的精心操作和测量,同样得不出令人信服的结果。物理实验的第二个特点是综合性越来越明显,随着科技的进步,实验仪器更新换代很快,过去一个力学实验,只用到力学知识和简单的测量仪器,现在的力学实验通常涉及电学、磁学、光学以及计算机等知识,仪器也复杂得多。物理实验的第三个特点是分层次教学,物理实验分为三个层次:基础性实验、综合性实验和设计性实验。第一个学期以基础性实验为主,第二个学期以综合性和设计性实验为主。这就要求我们一要努力提高自己的动手能力,不能“重学轻术”,二要努力拓宽知识面,并学会对各种知识的综合运用。

(一) 本课程的具体任务

1. 培养与提高学生进行物理实验的基本能力,掌握进行物理实验所需要的各种知识。
2. 培养与提高学生独立思考和创新意识,能够完成一些综合性、设计性较强的实验。
3. 培养与提高学生实事求是的科学作风,踏实认真的工作态度,遵守纪律、团结协作和爱护公物的优良品德。

(二) 课程的基本要求

1. 教学内容

- (1) 掌握误差的基本知识与数据处理的基本方法(如列表法、作图法、逐差法、最小二乘法等)。
- (2) 学会测量常用物理量(如长度、质量、时间、角度、温度、电流、电压、电阻、电磁场等)。

(3) 了解常用实验仪器(如千分尺、卡尺、读数显微镜、物理天平、秒表、温度计、电表、电阻箱与变阻器、灵敏与冲击电流计、电位差计与电桥、常用电源与光源、分光计等)的性能,并学会使用。

(4) 掌握基本的实验方法(如比较法、放大法、模拟法、补偿法、干涉法与转换测量法等)和操作技术(如正确地按照电路图接线,光路的共轴调整,仪器的零位调整等);

(5) 学习物理实验的设计方法。

2. 能力培养

(1) 独立实验的能力。

(2) 分析、研究的能力。

(3) 理论联系实际的能力。

3. 分层次教学

物理实验分为三种层次:基础性实验、综合性实验和设计性实验。

二、课程进行的三个环节

(一) 课前预习,写出本次实验的预习报告

预习时要认真阅读实验教材与实验参考书,在“实验报告纸”上写出预习报告。

1. 预习报告内容

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验原理 阐明实验的理论要点,写出待测量的主要计算公式,画出有关装置图(如电路图、光路图等)。

(4) 实验仪器 列出主要仪器名称、型号、规格、精度等级等。

(5) 实验内容及步骤 写出主要实验内容、关键步骤和注意事项。

(6) 数据表格 按照实验内容画出数据表格。

(7) 阅读思考题。

2. 预习报告的要求

(1) 在认真阅读实验教材的基础上写预习报告,不得抄袭别人的预习报告。

(2) 写预习报告要用专用的“实验报告纸”,不得用不合要求的纸。

(3) 字迹要工整,画图要用直尺、圆规和曲线板。

注:每次上课前交任课教师检查,不合格者不能做实验。

(二) 课上实验

课上实验是最重要的教学环节。对学生的要求是:

(1) 学生要在上课前到达实验室,不得迟到。因病、因事不能上课的同学,要有医务室或所在院系出具的假条,才予准假。

(2) 课上认真听老师讲解,按照实验步骤操作仪器,认真读取数据,把数据写在表格中,完成实验以后,一定请老师检查,老师认为合格予以签字。数据记录不得丢失,和实验报告订在一起,下一次上实验课时交给任课老师。

(3) 老师签完字,学生要拆线路、整理仪器,拣拾桌面和地面的遗弃物,经老师同意后,方可离开实验室。

注:无任课教师签字的数据无效。

(三) 撰写实验报告

1. 实验报告的内容

- (1) 本次实验的预习报告。
- (2) 有老师签字的数据表。
- (3) 数据处理过程和结果(包含计算公式、简单计算过程、作图、不确定度计算、结果表示等)。
- (4) 回答思考题。

2. 实验报告的要求

- (1) 实验报告要求独立完成,认真进行数据处理,不得抄袭别人的结果。
- (2) 纸面要整洁,字迹工整,用作图法处理数据时,要用坐标纸。
- (3) 下次上实验课时交实验报告。实验报告不能长期拖延不交,更不能拖到期末一起交。

三、实验室规则与学生实验守则

- (1) 做好课前预习,按时、按组上实验课,要独立完成实验和实验报告。
- (2) 遵守实验室制度,注意用电安全。
- (3) 保持实验室安静、清洁,实验完毕后整理好仪器,做好值日。
- (4) 爱护国家财产,因个人原因损坏仪器设备,要按学院规定予以赔偿。
- (5) 严禁弄虚作假,如发现私自涂改数据或抄袭他人报告者,本次实验按零分计。
- (6) 未写预习报告者或迟到 20 分钟以上者,不准进入实验室。
- (7) 无故旷课者按零分处理。

第二节 测量误差和不确定度

一、测量

(一) 直接测量和间接测量

- (1) 直接测量 将待测物体与标准量具进行比较,直接得到待测量的大小。
- (2) 间接测量 待测量由若干直接测量的物理量经过一定函数运算后获得。

(二) 等精度测量与不等精度测量

- (1) 等精度测量 指在相同的条件下进行的多次测量,如同一人,用同一个仪器,每次测量时周围环境条件相同,等精度测量每次测量的可靠程度相同。
- (2) 不等精度测量 若每次测量时的条件不同,或测量仪器改变,或测量方法、条件改变,这样所进行的一系列测量叫不等精度测量。

二、误差的基本概念

(一) 真值

任何物理量在一定时间内或一定条件下,都存在着一个客观值,这个客观值称为真值。物理量的真值一般很难通过测量而得知,但是能通过提高仪器的精度和改进测量方法,使测量值不断接近真值。

(二) 绝对误差和相对误差

1. 绝对误差

若某物理量真值为 a , 测量值为 x , 则绝对误差

$$\Delta x = x - a \quad (1.2.1)$$

2. 相对误差

绝对误差与真值的比值, 即

$$B = \frac{\Delta x}{a} \times 100\% \quad (1.2.2)$$

三、误差的分类

根据误差产生的原因及其对实验结果的影响, 误差主要分为两类:

(一) 系统误差

1. 定义

在相同条件下对同一物理量进行多次测量, 误差的绝对值和符号或者不变, 或者在改变实验条件时, 按确定的规律变化, 这种误差称为系统误差。如千分尺零点误差、钟表的快慢等。

2. 系统误差的类别

系统误差就其来源分为:

(1) 仪器误差 由于仪器制造或校准的不精确, 以及仪器没有调整到最佳状态所引起的误差。

(2) 理论与方法误差 由于实验理论的不完善, 实验公式具有近似性或实验方法不适当而引起的误差。

(二) 随机误差

1. 定义

在相同的条件下, 对同一个物理量进行多次测量时, 由于偶然的因素, 各次测量的误差时大时小, 时正时负, 既不可预测又无法控制, 这种误差被称为随机误差。

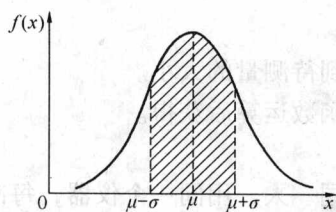


图 1.2.1 正态分布曲线

2. 随机误差的统计规律

有关理论和实践都证明, 当测量次数足够多时, 一组等精度测量数据的随机误差服从一定的统计规律, 也就是服从某种概率分布, 最典型的一种概率分布是正态分布。若横坐标表示某一物理量的测量值 x , 纵坐标表示该测量值的概率

密度 $f(x)$, 则正态分布曲线如图 1.2.1 所示, 其数学表达式为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.2.3)$$

式中

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}}$$

从曲线可看出, 当测量值在 $x = \mu$ 处的概率密度最大, 相应横坐标 μ 是测量次数 $n = \infty$ 时被测量的平均值。横坐标上任一点到 μ 值的距离 $(x - \mu)$ 为与测量值 x 对应的随机误差分量。随机误差小的概率大, 随机误差大的概率小。式中 σ 为正态分布的标准偏差, 是表征测量值分散性的参数, 其值是曲线上拐点处横坐标与 μ 值之差。图中曲线是概率密度分布曲线, 当曲线和 x 轴之间的总面积定为 1 时, 则曲线与过横坐标任意两点垂直直线围成的面积表示随机误差在相应范围内的概率。图中阴影部分的面积是随机误差落在 $\pm \sigma$ 之间的概率, 即测量值落在 $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ 区间中的概率, 经定积分计算为 $P = 68.3\%$ 。如将区间扩大到 $-2\sigma \sim +2\sigma$, 则 x 落在 $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ 区间中的概率提高到 95.4% ; x 落在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 区间中的概率为 99.7% 。

从图中可看出, 随机误差具有以下性质:

- (1) 单峰性 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大;
- (2) 对称性 大小相等、符号相反的误差出现的概率相等;
- (3) 有界性 误差的绝对值不会超过某一界限;
- (4) 可抵消性 在一定的条件下, 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零。

3. 算术平均值的标准误差

设对某一物理量 x 进行 n 次等精度测量以后, 得到的测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 其算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2.4)$$

由统计原理可知, 当测量次数趋于无穷大时, 测量值的算术平均值无限接近于该物理量的真值。当然实际的测量次数都是有限的, 我们可以用多次测量的算术平均值代替真值。某次测量值与算术平均值之差称为该次测量的残差。由于真值不可测量, 测量值与真值之差也不知道, 因此我们只能用残差代替误差。

经计算, 物理量 x 的算术平均值的标准误差

$$\sigma(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.2.5)$$

它表示测量值在 $[\bar{x} - \sigma(\bar{x}), \bar{x} + \sigma(\bar{x})]$ 范围内包含真值 a 的概率为 68.3% 。

四、不确定度

长期以来, 人们用误差来表示测量结果可信度的高低。误差是测量值与真值的偏差, 但真值是无法确定的, 它只是一种理想值或约定值。因此, 涉及具体数值的场合, 用不确定度代替误差是一个趋势。

(一) 概念

不确定度表示由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度。它是被测量的真值在某个量值范围的一个评定。

(二) 不确定度的意义及其与误差的关系

(1) 引入不确定度可以对测量结果的准确程度作出科学合理的评价。不确定度越小,表示测量结果与真值越靠近,可信度越高。比如,多次直接测量的结果

$$x = \bar{x} \pm u \quad (1.2.6)$$

式中, $\bar{x}$ 是算术平均值; u 是不确定度。它表示,被测量的真值以一定的概率(例如 68.3%)落在 $[x-u, x+u]$ 的数值范围内。

(2) 误差是指测量值与真值之差,由于真值的不可预知性,一般意义的误差也是未知的。不确定度与误差概念不同,它表征被测量的真值所处的量值范围,其大小可以计算或估计出来。

(3) 不确定度是在误差理论的基础上发展起来的。误差可能大于、小于或等于零,而不确定度是大于零的正数。不确定度是测量结果存在误差大小的度量。

(三) 分类

根据国际标准化组织等 7 个国际组织联合发表的《测量不确定度表示指南 ISO1993(E)》的精神,不确定度从估计方法上分为两类:

(1) A 类不确定度 在相同条件下的进行多次测量,用统计方法估算的分量,用 u_A 表示。

(2) B 类不确定度 用非统计方法估算的分量,用 u_B 表示。

(四) 计算

1. A 类不确定度的计算

A 类不确定度用统计方法进行估算,在物理实验教学中,我们约定 A 类不确定度等于算术平均值的标准误差,即

$$u_A = \sigma(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1.2.7)$$

2. B 类不确定度的计算

B 类不确定度不是用统计方法计算的,它由仪器的误差限和测量误差的分布来决定。常用仪器的仪器误差由生产厂家给出。在物理实验教学中,我们约定误差的概率分布是均匀分布,仪器误差为 $\sigma_{\text{仪}}$,由均匀分布理论,B 类不确定度为:

$$u_B = \frac{\sigma_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (1.2.8)$$

3. 总不确定度和相对不确定度

(1) 总不确定度

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{\sigma^2(\bar{x}) + \sigma_{\text{仪}}^2/3} \quad (1.2.9)$$

(2) 相对不确定度

相对不确定度等于总不确定度与测量平均值之比,即

$$B = \frac{u}{\bar{x}} \quad (1.2.10)$$

(五) 间接测量的不确定度

由于不确定度都是微小的量,相当于数学中的“增量”,因此间接测量不确定度的计算

公式与全微分公式类似。设间接测量量 N 与各直接测量量 $x, y, z, \dots$ 的关系为

$$N = f(x, y, z, \dots) \tag{1.2.11}$$

则间接测量不确定度的计算公式为

$$u = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 u_z^2 + \dots} \tag{1.2.12}$$

$$\frac{u}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\right)^2 u_z^2 + \dots} \tag{1.2.13}$$

式(1.2.12)适用于 N 为和差形式的函数，式(1.2.13)适用于 N 为积商形式的函数。

常用函数的不确定度传递公式详见表 1.2.1。

表 1.2.1

函 数	不确定度	相对不确定度
$N = x + y$	$u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$	$B = \frac{u}{N} = (\sqrt{u_x^2 + u_y^2})/N$
$N = xy$	$u = \sqrt{y^2 u_x^2 + x^2 u_y^2}$	$B = \frac{u}{N} = \sqrt{\left(\frac{u_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{u_y}{y}\right)^2}$
$N = x/y$	$u = \frac{x}{y} \sqrt{\left(\frac{u_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{u_y}{y}\right)^2}$	$B = \frac{u}{N} = \sqrt{\left(\frac{u_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{u_y}{y}\right)^2}$
$N = kx$ (k 为常数)	$u = k u_x$	$B = \frac{u_x}{x}$
$N = X^a$	$u = a x^{a-1} u_x$	$B = a \frac{u_x}{x}$
$N = \ln x$	$u = \frac{1}{x} u_x$	$B = \frac{1}{x \ln x} u_x$

五、测量结果的表示

(一) 书写形式

直接测量结果的表示

$$x = \bar{x} \pm u \tag{1.2.14}$$

$$B = \frac{u}{\bar{x}} \times 100\% \tag{1.2.15}$$

间接测量结果的表示

$$N = \bar{N} \pm u \tag{1.2.16}$$

$$B = \frac{u}{\bar{N}} \times 100\% \tag{1.2.17}$$

(二) 结果处理步骤

1. 同一条件下多次测量

(1) 确定系统误差；

(2) 计算平均值 $\bar{x}$ 及其标准误差 $\sigma(\bar{x})$, 尽量利用有统计功能的袖珍计算器;

(3) 计算 A 类分量 u_A 和 B 类分量 u_B ;

(4) 计算(合)不确定度 u , 只取 1~2 位有效数字;

(5) 正确表示测量结果, 不要忘写单位。

2. 一次测量

(1) 确定系统误差;

(2) 计算 B 类分量 u_B , 将 B 类分量作为一次测量结果的不确定度 u , 只取 1~2 位有效数字;

(3) 正确表示测量结果, 不要忘写单位。

3. 仪器误差的估算

(1) 米尺、螺旋测微计和读数显微镜等标有刻度的量、器具, 根据具体情况, 可取最小分度值的 1/10、1/5 或 1/2, 一般取最小分度值的 1/2。

(2) 游标卡尺等标有准确度的仪器 取其准确度为仪器误差。

(3) 电表等仪器没有直接给出仪器误差, 但给出了准确度等级, 其仪器误差经过计算才能得到。如指针式电表的仪器误差等于其量程值乘以准确度等级; 电桥、电阻箱的仪器误差等于示值乘以准确度等级再加上零值电阻, 由于它们各档的准确度等级是不同的, 所以要分档计算, 然后求和。

(4) 电子秒表的分辨率一般为 0.01s, 考虑到按表时超前或滞后引起的误差, 可取 0.5s 为仪器误差。

【例一】 用螺旋测微计测量小钢珠的直径, 5 次测量值分别是 2.997mm, 2.989mm, 2.998mm, 2.987mm, 2.988mm, 试求平均值、A 类不确定度、B 类不确定度和合不确定度, 并写出测量结果表达式。

解: 由式(1.2.4)

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = 2.9918\text{mm}$$

由式(1.2.7)

$$u_A = \sigma(\bar{d}) = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} \approx 0.0024\text{mm}$$

由式(1.2.8)

$$u_B = \frac{\sigma_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029\text{mm}$$

由式(1.2.9)

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{\sigma^2(\bar{d}) + \sigma_{\text{仪}}^2/3} = \sqrt{0.0024^2 + 0.0029^2} \approx 0.0038\text{mm}$$

$$d = \bar{d} \pm u = (2.992 \pm 0.004)\text{mm}$$

【例二】 用螺旋测微计测量圆柱体的体积, 已知直径 $d = \bar{d} \pm u_d = (20.080 \pm 0.006)\text{mm}$, 高度 $h = \bar{h} \pm u_h = (35.110 \pm 0.003)\text{mm}$, 求圆柱体的体积及其不确定度。

解:

$$\bar{V} = \frac{\pi}{4} \bar{d}^2 \bar{h} = 1.1113 \times 10^4 \text{mm}^3$$

$$\frac{\partial \ln V}{\partial d} = \frac{2}{d}$$

$$\frac{\partial \ln V}{\partial h} = \frac{1}{h}$$

由式(1.2.13)

$$\frac{u_{\bar{V}}}{\bar{V}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln V}{\partial d}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{\partial \ln V}{\partial h}\right)^2 u_h^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{d}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{1}{h}\right)^2 u_h^2} \approx 6.0 \times 10^{-4}$$

$$u_{\bar{V}} = \bar{V} \times \frac{u_{\bar{V}}}{\bar{V}} \approx 6.7 \text{ mm}^3$$

$$V = \bar{V} \pm u_{\bar{V}} = (1.1113 \pm 0.0007) \times 10^4 \text{ mm}^3 (B = 0.0006)$$

第三节 有效数字和数据处理

一、有效数字及其运算

(一) 有效数字概念

准确数字后面只保留一位欠准数字或可疑数字, 称作有效数字。有效数字最后一位存在着误差, 因此叫欠准数字或可疑数字。

有效数字的特点是:

(1) 有效数字的位数与测量仪器的精度密切相关。测量同一物理量, 所用仪器的精度越高, 则有效数字的位数越多。如测量某物体长度, 用最小刻度为 1mm 的米尺测量, 结果为 18.7mm, 3 位有效数字, 末位的“7”是估读的; 用最小刻度为 0.01mm 的螺旋测微计测量, 结果为 18.698mm, 5 位有效数字, 小数点后第三位的“8”是估读的。

(2) “0”的位置不同, 对有效数字位数的影响也不同。如 0.00851 是 3 位有效数字, 数字前的“0”对有效数字的位数无影响; 三个测量数据, $2.85\text{cm} \neq 2.850\text{cm} \neq 2.8500\text{cm}$, 因为它们有效数字的位数分别是 3、4、5 位, 有效数字位数的不同反映了测量精度的高低。

(3) 有效数字的位数与小数点位置和单位换算无关。如 $1.20\text{m} = 120\text{cm} = 0.00120\text{km}$, 但是不能写成 1200mm , 因为单位换算时不能改变有效数字的位数。

(4) 采用科学记数法。如 2000 要写成 2.000×10^3 , 0.0000352 要写成 3.52×10^{-5} 。

(二) 有效数字的运算规则

(1) 加、减法运算

① 计算结果的末位与参加运算的各项中小数点后位数最少的那一项的末位对齐。

② 有效数字尾数的取舍法则是“四舍六入, 逢五配双”。如 4.8356 取四位有效数字是 4.836, 取三位有效数字是 4.84, 取两位有效数字是 4.8。

【例三】 $12.34 + 2.3572 = 14.70$

$$\begin{array}{r} 12.34 \\ + 2.3572 \\ \hline 14.6972 \end{array}$$

(2) 乘、除法运算

① 两个数乘积的有效数字位数一般与参加运算各量中有效数字位数最少的相同, 但是如果最高位的乘积大于或等于 10 时, 结果的有效数字位数应比参加运算各量中有效数字位数最少的多取一位。

② 两个数相除，商的有效数字位数一般与除数、被除数中位数较少者的位数相同，但是如果被除数有效数字的位数小于或等于除数有效数字的位数，并且它的最高位的数小于除数最高位的数，则商的有效数字的位数应比被除数少一位。

【例四】 $3.523 \times 48.6 = 171.2$

$$\begin{array}{r}
 3.523 \\
 \times 48.6 \\
 \hline
 21138 \\
 28184 \\
 14092 \\
 \hline
 171.218
 \end{array}$$

【例五】 $4.52 \div 5.47 \approx 0.83$

$$\begin{array}{r}
 0.826 \\
 5.47 \overline{) 4.52} \\
 \underline{4376} \\
 1440 \\
 \underline{1094} \\
 3460 \\
 \underline{3282} \\
 178
 \end{array}$$

(3) 乘方和开方的运算规则与乘法的运算规则相同。

(4) 常数(如 π 、 g 等)和自然数(如纯数 2 等)，由于不是测量得到的，因此可以认为其有效数字的位数是无限多的，运算时所取的位数不少于各项中有效数字位数最少的那一位的位数。

(5) 运算的中间过程，参与运算的量可以取两位欠准数字，但最后结果仍要按照前面的规则来确定有效数字的位数。

(三) 测量数据的有效数字

根据有效数字的概念，一个测量数据只能保留一位欠准数字。在物理实验中，测量结果的不确定度一般取一位有效数字，而平均值的最末一位要与不确定度所在的位置对齐。

【例六】 $m = (321.55 \pm 0.6)g$ 的写法不正确，应改为 $m = (321.6 \pm 0.6)g$

【例七】 $I = (0.000256 \pm 0.000004)A$ 没有采用科学记数法，正确写法是：

$$I = (2.56 \pm 0.04) \times 10^{-4}A$$

二、数据处理

(一) 列表法

在记录实验数据时，将数据排列成表格的形式，使其能清楚地反映出各物理量之间的对应关系。用列表法记录实验数据是一种良好的工作习惯。

列表要达到以下要求：

- (1) 表格尽量简明, 便于表示物理量的对应关系, 处理数据方便。
- (2) 写明表的名称, 标明表头栏目中的物理量、符号及单位。
- (3) 表中数据的有效数字与所用仪器的准确度一致。
- (4) 把必须记录的实验条件记在表外。

(二) 作图法

1. 图示法

通过测量取得数据, 只是人们寻找事物发展变化规律的第一步。第二步, 人们要利用作图或其他方法, 发现事物发展的内在规律。选取适当的坐标纸, 把两组相关的测量数据中的每一对数值标成坐标纸的一个点, 叫做数据点, 然后根据实验的性质, 把这些点拟合成直线或曲线, 或连成折线, 如图 1.3.1 所示, 这就是图示法。

作图的要求:

(1) 必须用坐标纸作图, 物理实验一般选用直角坐标纸, 图纸的大小通常由数据的有效数字决定, 如果数据很精确, 而坐标纸很小, 或者用白纸作图, 作图的误差就远远大于实验误差。

(2) 要画坐标轴, 标明各轴所代表的物理量和单位, 在轴上标出刻度, 坐标原点的值不一定从 0 开始, 坐标轴的端点画上箭头。

(3) 要注意使所绘曲线均匀地充满图纸, 不应偏于一边或缩于一角, 坐标纸上的最小分格应与仪器的准确度相当。

(4) 根据实验数据在坐标纸上描出数据点, 不同曲线上的点用不同的符号来表示, 如“×”、“○”、“△”、“⊙”等。

(5) 根据数据点作出拟合直线或拟合曲线, 使各数据点均匀地分布在该线的两侧, 各数据点到拟合曲(直)线的距离(沿纵轴方向)之和为最小。拟合直线用直尺画, 拟合曲线用曲线板(云规)画。

(6) 在图纸的明显位置写出图的名称, 标出作者的姓名、班级以及当时的实验条件。

2. 图解法

利用已经做好的曲线, 求出待测量或得到经验方程, 叫做图解法。在物理实验中, 用图解法求直线的斜率, 经常碰到, 如图 1.3.2 所示。

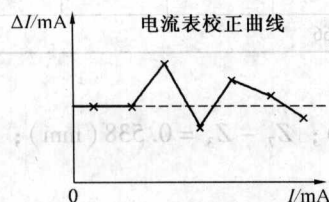


图 1.3.1 电流表校正曲线

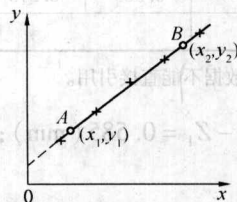


图 1.3.2 求拟合直线的斜率

图解法的步骤:

- (1) “两点定一直线”, 在拟合直线上选取距离不要太近的两个点 $A(x_1, y_1)$ 和 $B(x_2, y_2)$, 其坐标值在坐标纸上读出, 并用特殊记号标出。特别强调: 两个点不能是数据点。
- (2) 直线方程 $y = A + Bx$ 的斜率应为

$$B = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (1.3.1)$$