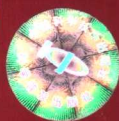
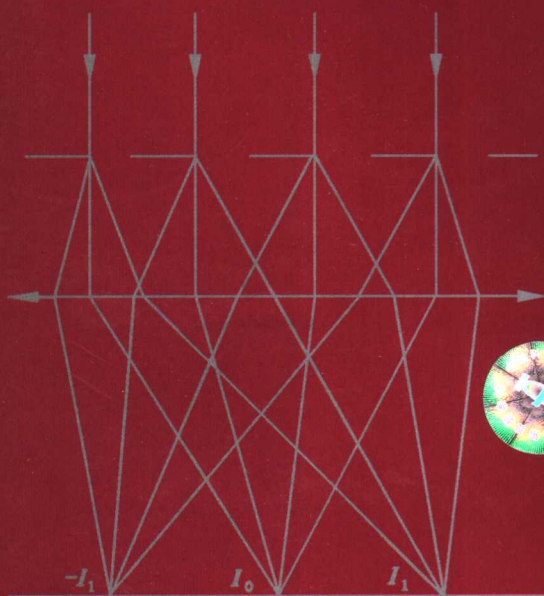
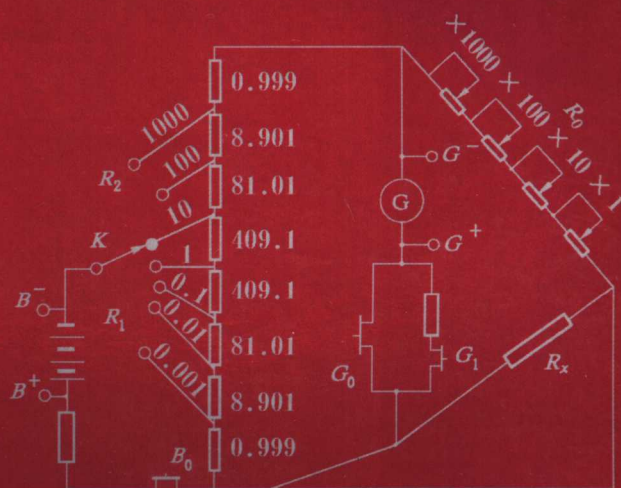
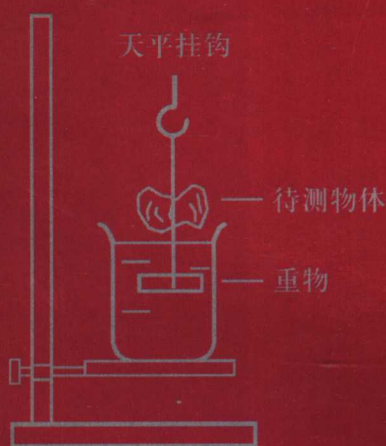


大学物理 实验讲义

倪苏敏 李 琳 高兴茹 主编



中国科学技术出版社

大学物理实验讲义

倪苏敏 李 琳 高兴茹 主编

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验讲义/倪苏敏,李琳,高兴茹主编. —北京:中国科学技术出版社,2001. 8
ISBN 7-5046-3115-9

I. 大… II. ①倪…②李…③高… III. 物理-实验-高等学校-教材 IV. 04-33
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 048312 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

责任编辑:杨 艳

责任校对:赵丽英

责任印制:安利平

中国科学技术出版社出版
北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081
电话:010-62103210 传真:010-62183872
科学普及出版社发行部发行
北京迪鑫印刷厂

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 12 字数: 320 千字

2004 年 8 月第 1 版 2006 年 7 月第 3 次印刷

印数:5501—6200 册 定价: 24.00 元

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

前 言

本书是根据《高等工业学校物理实验课程基本要求》，在我校多年教学实践基础上改编而成的。

工科大学物理实验是学生进入大学后遇到的第一门实验课，它既要以中学物理实验为起点，又要与以后其他实验实训课适当配合，还要注意到当前工科物理实验的学时，因此我们在这次改编中，对实验题目做了一些调整，保留了一些基本内容，增加了一些近代物理的内容和传感器方面的内容，提高了实验的综合性和实用性。

本书对各实验的原理都做了简要的论述，使学生通过实验课能比较好地掌握和运用理论知识，在各实验中都介绍了主要实验仪器，并比较详细地说明了实验方法和步骤，这样可使学生很快地独立完成实验，在一些实验中还提出几种实验方法供学生选用，以利于因材施教，在一些实验中给出了数据记录表格，供学生参考使用。

全书共6章。第一章，测量误差及数据处理的基本知识；第二章，力学、热学实验；第三章，电磁学实验；第四章，光学实验；第五章，近代物理和应用性实验；第六章，设计性实验。全书共选了30个实验。书末附录介绍了部分实验常用的仪器设备。本书的编写始终围绕着如何提高学生综合素质而进行。

本书的完成凝聚了近些年物理教研室全体教师和实验技术人员的智慧和劳动，是一项集体创作。除了本书编写人员外，还要特别感谢吴粟英、郭乃樱、王吉光、李芬、张世良、沈乃敏、和琴堂等教师。

本书由倪苏敏、李琳、高兴茹主编。参加本书编写工作的有：尚玉田、王美霞、倪苏敏、高兴茹、张颖、李琳、陈征、贺明、高子萍等教师。本书插图由刘萍、张颖、李琳、陈楠等教师绘制。

本书得到北京联合大学各级领导的大力支持和帮助，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，难免有错误和不足之处，恳请读者批评指正。

编者

2001年2月

修 订 说 明

这本书经过三年的使用,我们认为基本符合应用型工科大学物理实验教学的基本要求,但也有不足之处,这次由倪苏敏和李琳进行了部分修订,增加了设计性实验,希望学生通过设计性实验提高科学实验能力和创造能力。

编者

2004 年 5 月

目 录

绪论	(1)
第一章 测量误差及数据处理的基本知识	(3)
第一节 测量误差的基本知识	(3)
第二节 有效数字及其运算	(9)
第三节 数据处理的基本方法	(11)
习题	(14)
第二章 力学与热学实验	(17)
实验一 固态物质的密度测量	(17)
实验二 气轨上速度、加速度及守恒定律的研究	(21)
实验三 刚体转动惯量的测定	(28)
实验四 杨氏弹性模量的测定	(33)
实验五 驻 波	(38)
实验六 用电热法测定热功当量	(41)
第三章 电磁学实验	(46)
实验七 用稳恒电流场模拟静电场	(46)
实验八 用惠斯登电桥测电阻	(51)
实验九 示波器	(57)
实验十 灵敏电流计	(64)
实验十一 电势差计的使用	(72)
实验十二 感应法测量磁场	(78)
实验十三 霍尔效应测磁场	(85)
实验十四 用示波器测动态磁滞回线	(91)
第四章 光学实验	(95)
实验十五 分光计的调整和三棱镜顶角的测定	(95)
实验十六 利用牛顿环测透镜的曲率半径	(101)
实验十七 单缝衍射实验	(105)
实验十八 衍射光栅	(109)
实验十九 迈克尔孙干涉仪	(113)

第五章 近代物理和应用性实验	(118)
实验二十 密立根油滴实验	(118)
实验二十一 逸出功的测量	(124)
实验二十二 光电效应	(130)
实验二十三 夫兰克 - 赫兹实验	(134)
实验二十四 静电植绒	(139)
实验二十五 摄影基本知识	(143)
实验二十六 暗室技术	(149)
实验二十七 全息摄影	(153)
第六章 设计性实验	(157)
实验二十八 力学设计性实验	(157)
实验二十九 电学设计性实验	(158)
实验三十 光学设计性实验	(159)
附录	(160)
附录一 游标卡尺	(160)
附录二 螺旋测微计	(162)
附录三 TW - 05 型物理天平	(164)
附录四 DH1718 - B 型稳压电源	(166)
附录五 DH1718 - 1 型双路稳压稳流电源	(168)
附录六 ST16 型示波器	(170)
附录七 MUJ - II 型电脑通用计数器	(173)
附录八 MF20 型万用电表	(175)
附录九 DT830 数字万用表	(177)
附录十 SHARP EL - 5103S 计算器使用说明	(179)

绪 论

在大学的必修课程中有好几门实验课程,这些课程既有自己的特点,又互相配合、互相补充,由低年级到高年级不断深入、提高,使学生在毕业时具有一定的实验素养和进行实验研究的能力。物理实验是对大学生进行科学实验训练的一个重要环节,是进入大学后接触的第一门实验课程。通过物理实验不仅要加深对物理学原理的理解,学会一些物理量的测量方法,掌握一些基本仪器的使用和维修方法,更重要的是学习一些进行科学实验的基本方法和技能。

一、物理实验课的任务

1. 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习科学实验知识,加深对物理学原理的理解。

2. 培养与提高学生的科学实验能力,其中包括:

- (1)能够自行阅读实验教材或资料,做好实验前的准备;
- (2)能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器;
- (3)能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断;
- (4)能够正确记录和处理实验数据、绘制曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告;
- (5)能够完成简单的设计性实验。

3. 培养与提高学生的科学实验素养,要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学精神、严肃认真的工作态度、主动研究的探索精神和遵守纪律、爱护公共财产的优良品德。

本教材精选了30个典型的大学物理实验,力图通过这些实验使学生学习基本的实验方法,如:模拟法、比较法、补偿法、放大法等;学习常用的数据处理方法,如:列表法、图像法以及逐差法、最小二乘法等;掌握常用的实验仪器的构造原理和使用方法,如:游标卡尺、千分尺、天平、万用表、电桥、示波器、电势差计、分光计、显微镜以及X-Y记录仪、计算机等。当然,每个实验的教学内容、学习重点不尽相同。对此,学生可通过每个实验的“实验目的”进行了解。

希望同学们明确实验课的目的与要求,自觉地通过每一次实验课积累经验和知识,增长才干,培养科学精神,提高进行实验研究的能力和素养。

二、实验课的基本程序

一般来讲物理实验课由以下几个基本程序构成。

1. 实验前的预习

由于实验课的时间有限,而熟悉仪器和测量数据的任务又比较重,因此,为了在规定的时间内高质量地完成实验课的教学任务,要求学生应当做好实验前的预习。通过预习,明确实验目的,掌握该实验所依据的原理,了解实验内容、步骤和需注意的事项,写出预习报告。

2. 实验操作

进入实验室要遵守实验室规则。

实验中要认真操作,仔细记录,注意观察、分析、判断,培养实事求是的科学精神和认真、严谨的科学态度。

3. 完成实验报告

实验操作完成后,要及时完成实验报告,一般在两周内将实验报告交给任课教师。

三、实验报告及预习报告要求

实验报告是实验工作的总结,必须重视书写实验报告能力的培养。一份好的实验报告应写得简洁明了、工整而且有自己的见解。

实验报告内容应包括:

1. 实验序号、实验题目。
2. 实验目的。
3. 主要仪器名称、规格、型号。
4. 实验原理及方法步骤。包括简要原理、电路图或光路图或实验示意图、主要计算公式、公式中各代号的含义及单位,公式成立的条件,在实验中如何满足这些条件,以及主要的实验方法等(应简明扼要,不要照书抄)。
5. 实验注意事项。包括仪器的维护和保证测量精度的注意事项。
6. 原始数据记录。预习时应根据实验要求拟好数据记录表格(用另一张纸写),上课前交给教师审查,进行实验时应直接将实验数据记在原始记录表格上。原始记录是实验工作的第一手资料,是实验工作中最有价值的技术资料,做好原始记录是进行科学实验的基本功之一。同学们应给予足够重视。
7. 数据处理。将原始记录的数据誊写到实验报告上,并进行计算、作图及误差分析,最后写出实验结果。原始记录应附在报告上。
8. 小结或讨论。内容不限,可是在实验中观察到的一些现象的记录、分析或问题讨论,也可以是对实验的改进意见、实验心得体会等。

以上1~5作为预习报告的内容,应在课前写好,进入实验室时交教师检查。第6是在课上的测量记录,实验完成后交教师检查签字有效。第7和第8为课后完成内容。

最后将第1~8整理订在一起作为实验报告,一周内由课代表收齐交给教师。

四、物理实验室规则

1. 课前必须按指定的题目进行预习,并写好预习报告。进入实验室后经教师检查预习情况,认可后方能进行实验。
2. 遵守课堂纪律,保持安静的实验环境。实验应独立完成,不得由他人代做。
3. 学生应按规定的组号使用该组仪器进行实验。并在仪器使用登记卡上签上自己的姓名。未经允许,不得擅自取用别组仪器。
4. 实验中要爱护仪器,严格遵守操作规程。电学实验中的线路连接,必须经过老师检查无误后,才能接通电源进行实验。
5. 实验中损坏或丢失仪器者,应到实验室进行登记,并酌情赔偿。
6. 做完实验应先请教师审查实验数据和检查实验仪器,经教师检查合格后,学生将实验仪器收拾好放回原处。教师分别在原始数据和仪器使用登记卡上签字之后,学生方能离开实验室。原始数据若无教师签字,则该次实验不能通过。

第一章 测量误差及数据处理的基本知识

第一节 测量误差的基本知识

一、测量与误差

1. 测量

在物理实验中除了要仔细观察实验过程中发生的现象外,还要探索物理现象所遵循的规律,找到物理量之间的相互关系,特别是定量关系,这就必须对各物理量进行测量。

测量就是借助仪器,通过一定的方法进行实验比较,以某一计量单位把待测量定量地表示出来。测量中除特殊情况外,计量单位一般都采用国际单位制,如:千克(kg),米(m),秒(s)等。

按测量方法,测量可以分为直接测量和间接测量两种。

直接测量是将待测量与预先标定好的仪器、量具进行比较,直接从仪器、量具上读出量值大小的测量。例如,用米尺测长度,用天平称质量,用秒表测时间等都是直接测量,相应的物理量称为直接测量量。

间接测量则是依据待测量和某些直接测量量的函数关系,求出待测量数值的测量。例如,通过直接测量铜柱的高度 H 、直径 D 和质量 M 来确定铜柱密度 ρ :

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{4M}{\pi D^2 H}$$

这里 D 和 H 是直接测量量, ρ 就是间接测量量。

2. 测量误差

任何一个物理量,在一定的条件下都具有一定的数值,这是客观存在的。这个客观数值称为物理量的真值,我们用 x_0 表示,测量的目的就是要获得测量的真值。但是,由于实验条件、测量方法、测量仪器等各种因素的影响,测量结果不可能准确无误,所以测量值(用 x 表示)与真值之间总存在着差异,这种差异称作测量误差,测量误差可以用绝对误差(Δx)表示,也可以用相对误差(E)表示。

绝对误差 = 测量结果 - 被测量的真值

即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (\text{一般取 1 位})$$

相对误差 = $\frac{\text{测量的绝对误差}}{\text{被测量的真值}} \times 100\%$

即

$$E = \frac{\Delta x}{x_0} \quad (\text{最多取 2 位})$$

二、系统误差与随机误差

误差存在于测量过程的始终,引起误差的因素是多方面的,在实验中必须抓住那些起主

要作用的因素。测量中的误差主要分为系统误差和随机误差两种类型,这两种不同性质的误差要用不同的方法处理。

1. 系统误差

在相同条件下多次测量同一物理量时,测量值总是有规律地朝着某方向偏离真值的误差,称为系统误差。系统误差主要来源于仪器本身的缺陷或实验理论、实验方法的不严密。系统误差不能通过多次测量的方法消除,只能找到产生系统误差的原因,采用相应的方法消除或减少。

2. 随机误差

由于偶然或不确定的因素造成测量误差,其大小和正负都带有随机性,这类误差称为随机误差或偶然误差。例如,电压的随机波动,温度的微小起伏等。一般增加测量次数可以减少随机误差。

三、随机误差的估算

在下面的讨论中,我们约定系统误差已经消除或修正,只剩下随机误差。随机误差可以进行估算。下面我们介绍几种误差的估算方法。

1. 直接测量误差的估算

(1) 单次测量

在实际实验中,有些量是在动态中测量的,例如在升温过程中测量温度。这些量不可能进行多次重复测量。有些量根据实验的要求没有必要进行多次测量,我们可以取单次测量的值,作为测量结果。在单次测量的情况下,仍存在测量误差的估算。在正确使用仪器的情况下,测量误差一般不会超过仪器误差。因此在单次测量中可按仪器出厂鉴定书或仪器上直接注明的仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$,作为单次测量的误差。如没有注明也可取仪器最小刻度的一半作为单次测量的误差。

(2) 多次重复测量

为了减小随机误差,在可能的情况下总是进行多次测量,将各次测量的算术平均值作为测量的结果。在测量条件相同的条件下,对测量进行了 n 次测量(称为等精度测量)。测得 n 个值 $x_1, x_2, \dots, x_n$,它们的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

根据误差的统计理论,在一组 n 次测量中,其算术平均值 $\bar{x}$ 最接近于真值,称为最佳值,我们可以把它近似看作为真值。

在物理实验中,测量值的随机误差的估算方法主要有两种,分别介绍如下:

① 算术平均误差^①:

这种估算方法比较粗略,但计算方法简单。在实验中,除特别声明外都可用此法。

设各次测量值 x 与平均值 $\bar{x}$ 的误差分别为:

$$\text{第一次测量的误差 } \Delta x_1 = x_1 - \bar{x}$$

^① 严格来讲,误差是测量值与真值之差。但真值不可能测得,只能用算术平均值代替。各次测量值与平均值之差称为偏差。误差与偏差是有差别的。但习惯上往往不去区分偏差与误差的细微区别,所以在这里就把偏差称为误差。

第二次测量的误差 $\Delta x_2 = x_2 - \bar{x}$

·

·

·

第 i 次测量的误差 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$

·

·

·

第 n 次测量的误差 $\Delta x_n = x_n - \bar{x}$ 。把各次测量的误差取算术平均值,就是测量结果的算术平均误差。

$$\begin{aligned}\Delta x &= \frac{1}{n}(|\Delta x_1| + |\Delta x_2| + \cdots + |\Delta x_n|) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i| \quad (\text{注意:算术值只取正数})\end{aligned}$$

②标准误差(方均根误差):

在正式的误差分析和计算中大多采用此法。

(a) 仍用算术平均值作为测量的最佳值来代替真值,依次写出各次测量值的误差:

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

(b) 标准误差的定义:

在有限次(n 次)测量中的某一次测量值的标准误差用 S_x 表示:

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

标准误差不是测量值的实际误差,也不是误差范围,它只是对一组测量值可靠性的估计,一组值(测 n 次)的标准误差为 S_x ,就表示在该组测量值中,任一个测量值的误差,有 68.3% 的可能性是在 $(-S_x, +S_x)$ 区间内。所以在同一组测量值中,任一测量值的标准误差都是 S_x 。而算术平均值的标准误差用 δ_x 表示,称为均值误差:

$$\delta_x = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}$$

它也只表示算术平均值的误差有 68.3% 的可能性落在 $\pm \delta_x$ 的区间上。

显然 $\delta_x < S_x$ 这说明算术平均值的可靠性高于任何一次测量值。

假定多次测量结果的误差估算用算术平均误差 Δx ,考虑到多次测量也有仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 的影响,因此直接测量误差

当 $\Delta x > \Delta_{\text{仪}}$ 时,取 Δx ;

当 $\Delta x < \Delta_{\text{仪}}$ 时,取 $\Delta_{\text{仪}}$ 。

2. 间接测量误差的估算

间接测量的结果是由直接测量通过数学公式计算出来的。既然公式中所包含的直接测量结果都是有误差的,那么间接测量的结果也必然有误差,这就是误差的传递。直接测量误

差对间接测量误差的影响可以由相应的数学公式(称为误差传递公式)计算出来。下面介绍通过误差传递公式计算间接测量误差的一般方法。

设间接测量结果 y , 是直接测量结果 $x_1, x_2, \dots$ 的函数, 即 $y = f(x_1, x_2, \dots)$, 其中 $x_1, x_2, \dots$ 都是相互独立的测量值, 当 $x_1, x_2, \dots$ 存在误差 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots$ 时, 使 y 产生了相应的误差 Δy 。由于误差都远小于测量值, 所以误差相对于测量值来说都是微小量。因而误差传递可根据数学上的全微分求出。步骤如下:

(1) 写出 y 的全微分

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots$$

(2) 把微分号“d”用误差符号“ Δ ”代替, 并把全微分公式改写成误差传递公式, 这个步骤称为误差的合成。常用的合成方法有绝对值合成和方均根合成两种。这里只介绍绝对值合成。

把全微分公式改写成如下的误差传递公式

$$\Delta y = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \dots$$

Δy 是间接测量的绝对误差。

遇到积商形式的测量时, 则先对测量式取自然对数再求全微分, 最后写出误差公式较为简便。即对 $y = f(x_1, x_2, \dots)$ 取对数,

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

求全微分

$$\frac{dy}{y} = \frac{\partial \ln f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial \ln f}{\partial x_2} dx_2 + \dots$$

改写成误差传递公式

$$\frac{\Delta y}{y} = \left| \frac{\partial \ln f}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \dots$$

这里 $\frac{\Delta y}{y}$ 是相对误差。求出相对误差后, 可由

$$\Delta y = \frac{\Delta y}{y} y$$

再求出绝对误差。

绝对值合成方法与实际误差合成方法的情况可能有较大的出入, 但比较简单, 是一种常用的、简化的处理方法。我们在实验中一般都用这种方法来处理。

例1 测得三个电阻的阻值分别为

$$R_1 = 1060 \pm 1 (\Omega)$$

$$R_2 = 520.0 \pm 0.5 (\Omega)$$

$$R_3 = 2745 \pm 3 (\Omega)$$

求三个电阻串联后的阻值 R 及误差 ΔR , 并写出测量结果。

解: (1) 三个电阻串联的函数式为

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

(2) 求全微分: (因测量式是和差形式的函数, 故先求绝对误差较方便)

$$dR = \frac{\partial R}{\partial R_1} dR_1 + \frac{\partial R}{\partial R_2} dR_2 + \frac{\partial R}{\partial R_3} dR_3$$

有

$$dR = dR_1 + dR_2 + dR_3$$

(3) 写成误差传递公式:

绝对值合成:

$$\Delta R = |\Delta R_1| + |\Delta R_2| + |\Delta R_3|$$

(4) 计算:

$$\begin{aligned} R &= R_1 + R_2 + R_3 \\ &= 1060 + 520.0 + 2745.0 = 4325.0 (\Omega) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta R &= |\Delta R_1| + |\Delta R_2| + |\Delta R_3| \\ &= 1 + 0.5 + 3 \approx 5 (\Omega) \end{aligned}$$

(绝对误差一般只保留一位数,首位是1的可保留两位)

$$\text{相对误差 } E = \frac{\Delta R}{R} = \frac{5}{4325} = 0.12\% \quad (\text{相对误差一般保留两位小数})$$

(5) 测量结果:

$$R = 4325 \pm 5 (\Omega)$$

$$E = 0.12\%$$

(测量的末位数字应与绝对误差位数取齐)

例2 用流体静力称衡法测固体密度 ρ 的公式为

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \rho_0$$

$$\text{测得 } m_1 = 24.37 \pm 0.03 (\text{g})$$

$$m_2 = 15.04 \pm 0.03 (\text{g})$$

$$\rho_0 = 0.9982 \pm 0.0003 (\text{g/cm}^3)$$

试写出 ρ 的测量结果。

$$\text{解: (1) 测量式 } \rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \rho_0;$$

(2) 求全微分 (因测量式是积商形式的函数,故先求相对误差较简便)。

$$\text{取对数 } \ln \rho = \ln m_1 - \ln(m_1 - m_2) + \ln \rho_0$$

求全微分

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dm_1}{m_1} - \frac{dm_1 - dm_2}{m_1 - m_2} + \frac{d\rho_0}{\rho_0}$$

合并同一变量系数

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{\rho} &= \left(\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_1 - m_2} \right) dm_1 + \frac{dm_2}{m_1 - m_2} + \frac{d\rho_0}{\rho_0} \\ &= \left[\frac{-m_2}{m_1(m_1 - m_2)} \right] dm_1 + \frac{1}{m_1 - m_2} dm_2 + \frac{d\rho_0}{\rho_0} \end{aligned}$$

(3) 写成误差传递公式:

绝对值合成:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \left| \frac{-m_2}{m_1(m_1 - m_2)} \right| \Delta m_1 + \left| \frac{1}{m_1 - m_2} \right| \Delta m_2 + \left| \frac{1}{\rho_0} \right| \Delta \rho_0$$

(4) 测量结果的表示:

$$\rho = 2.607 \pm 0.014 (\text{g/cm}^3)$$

$$E = 0.54\%$$

四、误差理论的应用

如前所述,测量误差存在于实验的始终。学习、了解、掌握误差理论是物理实验的目的之一。下面从几个方面介绍误差理论的应用。

1. 几种常用的消除系统误差的技巧

(1) 交换法

这是将测量中某些条件相互交换,使它们产生的系统误差对测量结果的影响相反,而相互抵消。例如,天平的复秤法就是将重物与砝码交换位置进行称量,取平均值即可消除天平不等臂引起的系统误差。

(2) 倒号法

改变测试条件中的电流方向或磁场方向等,使系统误差改变符号,两次测量值取平均,即可消除某些系统误差。例如,用霍尔元件测磁场时,分别改变电流和磁场的方向进行测量取平均值,可消除霍尔元件装置引起的系统误差。

(3) 替代法

这种方法是在测量条件不变的情况下,用已知标准量替代被测量来进行测量的。例如,用电桥测电阻时,调整平衡后用可变标准电阻代替被测电阻,调标准电阻重新达到平衡后,标准电阻的示值即为待测电阻的阻值。待测量的误差主要由标准量的误差决定。这种方法也常用来消除实验中其他元器件引起的系统误差。

2. 实验中有关理论的必要修正和补充

一般描述物理规律的理论公式都是建立在理想条件、理想模型的基础之上的,将这样的公式用于实验中,需要考虑一些不可忽略的客观条件对实验的影响。例如,用伏安法测电阻所依据的公式 $R = V/I$ 中, V 应为电阻 R 上的电压, I 应为通过 R 的电流,可是在测量中如果按图 0-1 线路接线,则电流表 A 测量的确实是通过 R 的电流 I ,但电压表 V 测得的却是 A 上的电压 V_A 和 R 上的电压 V_R 之和。因此用电压表的读数代入公式计算时,所得的电阻

$$R' = V/I = (V_A + V_R)/I = R_A + R$$

R' 肯定比实际值 $R = V_R/I$ 要大,这是因为实验方法不完善而引入的系统误差。这种误差也可以通过分析加以修正。从上式知 $R' = R_A + R$, 所以只要知道电流表内电阻 R_A , 根据 $R = R' - R_A$ 或 $R = \frac{V(\text{电压表读数})}{I(\text{电流表读数})} - R_A$, 用此式计算出的 R 就是真正的电阻的数值。

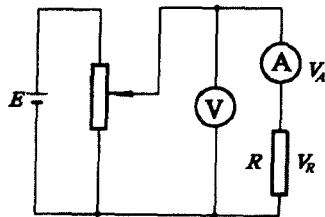


图 0-1 伏安法测电阻电路图

3. 运用等分配方案选择最佳的实验仪器组合

如果在测量之前,对间接测量的精确度提出了一定的要求,如何确定各直接测量量的精确度呢? 这个问题在实际工作中是会经常遇到的,通常采用

等分配方案。例如,在利用单摆测重力加速度的实验中,有

$$g = 4\pi^2 L / T^2$$

式中 L 是单摆的摆长, $L = l - (D/2)$, 它是悬挂点到球心的距离。 l 是从悬点到球的下端的长度, g 是当地的重力加速度, D 是摆球的直径。

我们应用误差理论中阐述的求间接测量误差的方法,由上式可得到

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta L}{L} + 2 \frac{\Delta T}{T}$$

如果使用单摆测量某地的重力加速度 g , 要求结果 $(\Delta g)/g \leq 0.2\%$ 时, 则可如下确定测量摆长 L 和周期 T 的仪器的精度。

已知 $L \approx 100\text{cm}$, $T \approx 2\text{s}$ 。根据 $(\Delta g)/g = (\Delta L)/L + 2(\Delta T)/T \leq 0.002$ 的要求, 采用等分配方案可确定 $(\Delta L)/L \leq 0.001$, 因为已知 $L \approx 100\text{cm}$ 所以 $\Delta L \leq 0.1\text{cm}$, 这样使用最小分度为毫米的米尺去测量是可以满足此要求的;

又已知 $T \approx 2\text{s}$, 所以 $\Delta T \leq 0.001\text{s}$, 这表示如果只测量一个周期, 那就要用毫秒仪去测量, 才能满足要求, 但是单摆具有等时性, 亦即 θ 很小时, 单摆摆动的周期总是相等的, 因此我们可以连续测量许多个周期, 比如连续测 n 个周期的时间为 t , 则 $t = nT$, $(\Delta t)/t = (\Delta T)/T$, 亦即 $\Delta t = n\Delta T$, 例如, 取 $n = 100$, 则 $\Delta t = 100 \times 0.001\text{s}$, 这样用最小分度为 0.1s 的停表去测量就可以满足要求。

4. 运用误差传递公式, 找出影响误差的主要测量量

在一个实验中, 往往存在多个测量量, 它们都存在测量误差, 换句话说, 实验结果的误差包含着各个测量量的误差。通过误差传递公式比较这多个测量量的误差, 可以发现其值有大有小, 在实际测量时, 就要注意误差较大的测量量的测量精度, 尽可能减少其对实验结果的影响。例如, 用流体静力称衡法测固体密度 ρ 的公式为

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \rho_0$$

运用误差传递公式, 可知相对误差 $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ 为

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \left| \frac{-m_2}{m_1(m_1 - m_2)} \right| \Delta m_1 + \left| \frac{1}{m_1 - m_2} \right| \Delta m_2 + \left| \frac{1}{\rho_0} \right| \Delta \rho_0$$

假定式中 $m_1 = 24.31 \pm 0.03$, $m_2 = 15.04 \pm 0.03$, $\rho_0 = 0.9982 \pm 0.0003$, 则

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 0.20\% + 0.32\% + 0.03\%$$

由此可知, m_1 和 m_2 引入的误差相当, 但 m_2 引入的误差更大。 ρ_0 引入的误差非常小, 在实验室实验中可以忽略不计, 视 ρ_0 为一常数。如果计及 ρ_0 引入的误差, 那么就要提高 m_1 和 m_2 的测量精度, 尤其是 m_2 的测量精度。

第二节 有效数字及其运算

在实验中我们所测的被测量都是含有误差的数值, 对这些数值不能任意取舍, 要根据测量误差来定, 所以在记录数据、计算以及书写测量结果时, 究竟应写出几位数字, 必须遵循一定的法则, 这就是有效数字及其运算的规则。

一、有效数字

1. 有效数字的定义

测量结果中可靠的几位数字加上存疑的一位数字统称为测量结果的有效数字。例如用毫米分度的米尺测量一物体的长度测得物体的长度在 13.4 ~ 13.5cm 之间。因为米尺的最小分度是 1mm, 所以正确的读数除了读出米尺上有刻线的位数 13.4 之外, 还应该估计一位, 即读到十分之几毫米。例如, 测得物体长度为 13.47cm。其中 13.4 三个数字都是准确的, 只有 7 是估计的。当然不可能估计得非常准确, 故“7”这个数字称为存疑数字, 有效数字中只保留一位(最后一位)存疑数字, 多保留是没有意义的。13.47 称为四位有效数字。同理, 20.013 称为五位有效数字。其中的 3 是存疑的。3 前面的数字都是准确的。值得注意的是当物体的两端正好都与米尺的刻线对齐时, 别忘了存疑数字“0”。例如, 某物体长度为 25.70cm, 表示“0”是存疑的, 另一位同学测量时, 很可能测得长度为 25.69cm 或 25.71cm。如果测量结果是 15.00cm, 则表示物体的一端与“15cm”的刻线对齐, 不可能与 14.9cm 或 15.1cm 的刻线对齐。所以前面三个数字“15.0”都是准确的, 只有最后一个“0”才是存疑的, 15.00 也是四位有效数字。

2. 确定测量结果的有效数字的方法

根据有效数字的定义, 有效数字的最后一位也应是随机误差所在的那一位。因为随机误差本身就是一个估计值, 因此在一般情况下误差的有效数字只取一位, 特殊情况也不能超过两位。在书写测量结果时, 测量值的最后一位数应与误差位对齐。例如:

$$R = 4325 \pm 5 (\Omega)$$

$$\rho = 2.607 \pm 0.014 (\text{g/cm}^3)$$

由此可知, 测量结果的有效数字完全由绝对误差决定。

有效数字一方面表示了被测量的数值, 同时也表示了测量仪器的精度。同一物体用不同精度的仪器来测量时, 得到的有效数字不同。有效数字位数越多测量的精度就越高。例如, 分别用不同精度的测量仪器对同一铝块的厚度 d 做单次测量, 测量结果如下:

用钢尺测量 ($\Delta_{\text{仪}} = 0.3\text{mm}$)

得

$$d = 4.0 \pm 0.3\text{mm}$$

$$E = \frac{0.3}{4.0} = 7.5\%$$

用卡尺测量 ($\Delta_{\text{仪}} = 0.05\text{mm}$)

得

$$d = 4.05 \pm 0.05\text{mm}$$

$$E = \frac{0.05}{4.05} = 1.2\%$$

用千分尺测量 ($\Delta_{\text{仪}} = 0.005\text{mm}$)

得

$$d = 4.043 \pm 0.005\text{mm}$$

$$E = \frac{0.005}{4.043} = 0.12\%$$

由此可见, 有效数字多一位, 相对误差几乎要小一个数量级。因此, 有效数字不要任意取舍。一般来说, 两位有效数字对应于十分之几至百分之几的相对误差, 三位有效数字对应于百分