



“十三五”普通高等教育规划教材

Putong Wuli Shiyan

普通物理实验

主 编 鲁 芬



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十三五”普通高等教育规划教材

普通物理实验

主 编 鲁 芬
副主编 姚中秀 郭 锐
程 翊 赵宗坤

北京邮电大学出版社
• 北京 •

内 容 简 介

本书根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》和《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合编者在武昌工学院多年的教学实践经验和教学研究成果，并借鉴同类教材改革成果编写而成。

全书共5章，包括绪论，第1章测量误差、不确定度与数据处理，第2章基础性、验证性实验，第3章综合性实验，第4章设计性实验，第5章物理仿真实验等内容。

图书在版编目(CIP)数据

普通物理实验 / 鲁芬主编. -- 北京:北京邮电大学出版社,2018.1

ISBN 978-7-5635-5348-8

I. ①普… II. ①鲁… III. ①普通物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第307959号

书 名 普通物理实验
主 编 鲁 芬
策 划 人 苏文刚
责任编辑 张保林
出版发行 北京邮电大学出版社
社 址 北京市海淀区西土城路10号(100876)
电话传真 010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
网 址 www.buptpress3.com
电子信箱 ctrd@buptpress.com
经 销 各地新华书店
印 刷 北京泽宇印刷有限公司
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 15.5
字 数 394 千字
版 次 2018年1月第1版 2018年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-5348-8

定 价: 34.50 元

如有质量问题请与发行部联系
版权所有 侵权必究

前 言

大学物理实验是高等理工院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是工科学生接受系统实验方法和实验技能训练的开端,自始至终占有极其重要的地位。21世纪科技的发展要求高校更注重人才思维能力与创新能力的培养,给高校的课程建设与改革明确了更艰巨的目标:必须建立一种适合当代科技发展,有利于培养具有深厚基础知识和创造性人才的教学体系。大学物理实验作为高校的重要基础课,它的改革与实践对素质教育的实施,显得更加突出,尤为重要。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

本书根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》和《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》,结合编者在武昌工学院多年的教学实践经验和教学研究成果,并借鉴同类教材改革成果编写而成。全书共5章,包括绪论,第1章测量误差、不确定度与数据处理,第2章基础性、验证性实验,第3章综合性实验,第4章设计性实验,第5章物理仿真实验等内容,并且将常见的物理实验仪器和常数附表分别编写在两个附录中供读者参考。

本教材体现了以下几个特点:

1. 整个教材中的实验由易到难分成四部分,包括基础性、验证性实验,综合性实验,设计性实验和物理仿真实验,符合学生的学习规律和认知特点。

2. 教材中专门安排第1章讲解测量误差、不确定度和数据处理的知识。由误差分析理论比较自然地过渡到目前国际国内普遍表示误差的方法——不确定度,让学生初步掌握不确定度的概念及其估算方法,使其在后续实验中能较严谨地表示测量结果和计算测量量的误差。

3. 每个实验的仪器均与本校实验室仪器配套,仪器的操作方法和注意事项写得非常详细,实验步骤结合有关仪器撰写,目的是照顾基础较差的学生,能较好地完成实验。

4. 每个实验都给出了一定数量的思考题,目的是帮助学生更好地理解原理、方法,规范地完成操作、原始数据的记录及实验报告。

5. 设计性实验单独一章,目的是培养学生的自学能力、综合运用能力、独立的设计及工作能力。

6. 仿真实验是计算机多媒体技术发展的产物,利用软件虚拟实际仪器,建立虚拟实

验环境,模拟真实的实验过程。对于仪器复杂、昂贵的实验,提供了一个廉价的操作平台。

本书由鲁芬主编,负责制订本教材的编写提纲,提出编写要求,并进行全书的修改和统稿工作。姚中秀、郭锐、程翊、赵宗坤任副主编。各章节实验的执笔人如下:鲁芬(绪论,第1、2、3、5章,第4章实验30、实验31、实验32、实验40、实验41,附录1,附录2,参考文献),姚中秀(第4章实验36、实验37、实验38、实验45),郭锐(第4章实验39、实验42),程翊(第4章实验34、实验43、实验44),赵宗坤(第4章实验28、实验29、实验33、实验35)。鲁芬老师组织了编写讨论会并负责组织出版等工作。本书编写过程中,参考并借鉴了一些兄弟院校的教材,在出版过程中得到武昌工学院教务处、信息工程学院、机械工程学院、土木工程学院、食品工程学院的关心和支持,并得到北京邮电大学出版社的大力支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者业务水平有限,加之时间仓促,书中难免存在缺点和错误,敬请读者批评指正,以便再版时更正。

编 者

2017年11月于武昌工学院

目 录

绪论	1
第 1 章 测量误差、不确定度与数据处理	4
1.1 测量误差	4
1.2 不确定度	6
1.3 数据处理方法	10
1.4 综合应用实例	14
练习题	15
第 2 章 基础性、验证性实验	17
实验 1 基本测量与物质密度	17
实验 2 热的不良导体导热系数的测定	28
实验 3 拉脱法测定液体表面张力系数	32
实验 4 液体黏滞系数的测定	36
实验 5 刚体转动惯量的测量	39
实验 6 用稳恒电流场模拟静电场	49
实验 7 电阻的伏安特性	52
实验 8 示波器的调整和使用	55
实验 9 变阻器的分压特性和限流特性	63
实验 10 分光计测量三棱镜的顶角和折射率	67
第 3 章 综合性实验	72
实验 11 拉伸法测定金属丝的杨氏模量	72
实验 12 霍尔法测量非均匀磁场	75
实验 13 二极管特性的研究	79
实验 14 声速的测定	81
实验 15 双臂电桥测低值电阻	85
实验 16 电位差计的原理及应用	90
实验 17 等厚干涉	96
实验 18 光栅衍射	101

实验 19	光的偏振	104
实验 20	光电效应实验	108
实验 21	密立根油滴实验	111
实验 22	用磁聚焦法测电子荷质比	118
实验 23	夫兰克-赫兹实验	121
实验 24	金属电子逸出功的测定	124
实验 25	用示波器观测铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线	128
实验 26	混沌	136
实验 27	全息照相	140
第 4 章	设计性实验	143
实验 28	不规则形状固体密度的测量	143
实验 29	测量冰的熔解热	144
实验 30	气体比热容比的测定	148
实验 31	冷却法测量金属的比热容	150
实验 32	重力加速度的测量	154
实验 33	弹簧振子的特性研究	160
实验 34	液体折射率测定的设计与实验	163
实验 35	单臂电桥测检流计内阻	166
实验 36	基于补偿原理的伏安法测低值电阻电路的设计	168
实验 37	直流稳压电源的设计与制作	172
实验 38	电源控制电路特性研究	175
实验 39	测量小灯泡伏安特性曲线	177
实验 40	惠斯登电桥测中值电阻	181
实验 41	电表的改装和校准	185
实验 42	用衍射法和劈尖干涉测量细丝直径	188
实验 43	分光计的调整和使用	192
实验 44	迈克耳孙干涉仪的调节和使用	198
实验 45	普通照相技术	202
第 5 章	物理仿真实验	207
附录 1	常用仪器设备	214
一、电磁学常用仪器	214
二、光学常用仪器	222
附录 2	附表	226
附表 1	国际单位制	226
附表 2	物理常量表	229
附表 3	物质密度表	230

附表 4	海平面上不同纬度处的重力加速度	231
附表 5	固体的线膨胀系数	231
附表 6	在 20 °C 时某些金属的弹性模量(杨氏模量)	232
附表 7	在不同温度下空气接触的水的表面张力系数	232
附表 8	不同温度时水的黏滞系数	233
附表 9	不同温度时干燥空气中的声速	234
附表 10	固体导热系数 λ	234
附表 11	某些固体和液体的比热容	235
附表 12	某些金属和合金的电阻率及其温度系数	235
附表 13	常用热电偶的温差电动势	236
附表 14	在常温下某些物质相对于空气的光的折射率	237
附表 15	常用光源的普线波长表	238
参考文献	239

方法和实验技能训练的开端,也是培养实验技能和科学素质的基础。

二、大学物理实验课的任务

1. 通过对有关物理学现象的观察、分析和对有关物理量的测量、计算,加深对有关物理学理论的理解,巩固所学的理论知识,并从中学习有关物理实验的基本知识,包括实验数据处理知识,掌握基本实验方法,如平衡法、模拟法和换测法等,训练基本实验技能。

2. 培养和提高学生的科学实验能力,包括自学能力、动手能力、分析判断能力、书面表达能力、初步的设计制作能力。具体包括:

- 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知识,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、绘制数据曲线、分析误差原因、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。包括实事求是、认真严谨、勇于探索、创新的精神,以及团结协作、遵守纪律、爱护公物的基本素养等。

三、大学物理实验课的要求

物理实验课的基本要求主要包括三个步骤,包括课前预习、课堂实验操作、课后完成报告。

1. 课前预习

预习要仔细阅读教材,明确实验目的;要弄清实验方法所依据的原理、条件;了解所用的仪器及其工作原理、操作方法和实验过程中的注意事项;熟悉实验内容,写好实验预习报告,设计好记录实验数据的表格。

2. 实验操作

实验课堂的操作应注意以下几点:

- 1) 学生须遵守实验室规则以及仪器操作规则,先懂后做,认真严谨、细致耐心;对简单问题能够自行排除。听从教师指导,熟悉各种仪器的使用方法和操作,认真完成实验。
- 2) 观察数据要注意有效数字和单位,依据有效数字法则,认真记录实验数据,绝不允许伪造或抄袭他人数据。
- 3) 实验完毕后,务必将所用实验仪器设备恢复原位,关闭电源和水源,做好实验室清洁卫生工作,并将实验数据交教师审阅签字后方可离开实验室。

3. 撰写实验报告

在做完实验后,应对实验数据进行认真的分析和处理,做出合理结论,最后才能写出完整的实验报告。具体要求如下。

- 1) 数据处理:在数据处理过程中,应首先按照误差理论和有效数字运算法则处理实验数据,列表或绘出曲线;分析实验数据的特点和规律,计算出测量的结果;最后分析误差的来源,并讨论存在的问题和改进方案。
- 2) 撰写实验报告:完整的实验报告应包括实验名称、实验目的、实验仪器(仪器名称、性能

及精度)、实验原理、实验方法(步骤)、(以上应在预习报告中完成)实验数据记录及处理(包括图表)、测量结果表达式($x = \bar{x} + \Delta_x$)、误差分析和实验心得。

在撰写实验报告时,应做到用语确切,文字通顺,字迹工整,还应在报告的开头注明实验时间、实验者姓名、学号、专业、实验名称、实验学时等信息,经教师签名的数据记录单也应作为实验报告的附件一起上交。

四、大学物理实验课程考核办法

大学物理实验属于独立设置的实验课,课程总评成绩由平时成绩、实验成绩、期末成绩三部分组成,各部分占总评成绩的比例分别为 30%、30%、40%。

平时成绩由考勤和课堂表现两部分构成,各占 50%。

实验成绩由每次实验分取平均构成。

期末成绩由期末操作考试分构成,考试主要考查实验基础知识,如实验原理、常用仪器的调整和使用,实验现象的分析和判断,故障排除,数据处理等。

注意:

1. 无原始数据的报告一律为不及格;
2. 违反操作规程者要扣操作分。

第 1 章 测量误差、不确定度与数据处理

本章主要介绍测量误差、误差的估计——不确定度、实验数据处理和实验结果表达等基本知识,由于有些知识涉及面广,深入讨论就超出了本课程的范围,本书只运用相关学科的某些结论和计算公式,不进行深入讨论。

1.1 测量误差

1.1.1 测量的概念

所谓测量,就是将被测量的物理量与作为测量单位的标准量进行比较,确定其比值的过程。分为直接测量和间接测量。

1) 直接测量

指使用仪器或量具,直接测得(读出)被测量的数值的测量。该物理量称为直接测量量。

2) 间接测量

指依据直接测量量,通过一定的关系式计算而得到被测量的数值的测量。需要通过间接测量求得结果的物理量称为间接测量量。

1.1.2 测量误差

在一定条件下,任何物理量的大小都有一个客观存在的真实值,称为真值。测量的最终目的都是要获得物理量的真值。但由于测量仪器精度的局限性、测量方法或理论公式的不完善性和实验条件的不理想,测量人员不熟练等原因,使得测量结果与客观真值有一定的差异,这种差异称之为误差。误差有两种表示方法:绝对误差和相对误差。

1) 绝对误差:测量值和真值不可能完全相同,它们之间或多或少地存在一定的偏差,这种测量值(x)与真值(a)之差的绝对值称为绝对误差,记为 δ_x

即
$$\delta_x = |x - a| \quad (1-1)$$

2) 相对误差:绝对误差反映了测量结果的准确程度,为了考虑测量值本身大小的影响,常用相对误差 E 来表示测量结果的准确程度。

$$E_x = \frac{\delta_x}{a} \times 100\% \quad (1-2)$$

任何测量都不可避免地存在误差。在误差必然存在的条件下,物理量的真值是不可知的。

1.1.3 误差的分类及减少的方法

按照误差产生的原因,误差可分为:系统误差、随机误差。

1. 系统误差

在对同一被测量的多次测量过程中,绝对值和符号保持恒定或以可预知的方式变化的测量误差的分量。系统误差的特征是其确定性,在测量条件不变时,有确定的大小和符号,当测量条件改变时按照一定的规律变化,增加测量次数并不能减少系统误差。

系统误差主要来源于原理和方法的近似性(理论公式的近似性、实验条件达不到要求、测量方法不够完善等),仪器误差(仪器本身不可能制造得无限精密,总是存在着某些缺陷),以及观察者的个人误差(由于实验者本人的固有习惯、生理或心理特点所带来的误差)。可以通过原理和方法的改进,仪器的校正和实验者纠正实验习惯等来减少系统误差。

2. 随机误差

多次观测同一量时,误差的绝对值和符号的变化时大时小,时正时负,以不可预知方式变化的这种误差称为随机误差。其特征是具有随机性。随机误差来源于实验中各种因素的微小变化,如电压的波动、温度的起伏、气流的扰动、周围电磁场的干扰以及个人行为的随机性等。如果测量次数足够多,人们发现随机误差服从统计规律,最典型的是正态分布,其特征如下。

- (1) 单峰性:绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。
- (2) 对称性:绝对值相等的正负误差出现的概率相同。
- (3) 有界性:绝对值很大的误差出现的概率趋近于零,即误差的绝对值不超过一定限度。
- (4) 抵偿性:随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋近于零。

虽然随机误差随测量次数的增加而减少,但随着次数的增加其减少的速度放缓,且增加测量次数不可能减少系统误差,故在物理实验中一个物理量的测量次数通常取5~10次,以免浪费不必要的时间和精力。在系统误差较小的情况下,我们有理由认为测量值的算术平均值最接近测量值的真值,称为约定真值

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

$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ 称为残差,虽然残差有正有负,有大有小,常用方均根法对它们进行统计,得到的结果就是单次测量系列值的标准偏差,以 S_x 表示

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-3)$$

n 为测量次数。目前国际上普遍采用这一标准偏差表示测量的随机误差。

1.1.4 测量仪器的精度

物理实验是依靠测量仪器来进行的,测量结果的误差大小在很大程度上取决于测量仪器是否准确,通常用精度和级别来描述仪器的这种性质。

仪器的精度通常指它能分辨的物理量的最小值,仪器精度越高,即它的分度越细,产生的偏差就越小。由于多种因素,如材质不均匀、加工装配的欠缺以及环境(如温度、湿度、震动、杂散光、电磁场等)的影响,仪器的精度受到一定的限制。按照标准,在正常使用条件下(如温度、

湿度、放置方式、额定功率等都符合要求),用某种级别的仪器进行测量时,最大偏差有具体规定,这种最大偏差也叫仪器的极限误差或公差,我们用 $\Delta_{\text{仪}}$ 来表示。可在产品说明书和仪器手册中查到。

仪器的级别和最大允差有关,如模拟式(指针式)电表级别分为 5.0、2.5、1.5、1.0、0.5、0.2、0.1 等。每一量程的最大允差 $\Delta_{\text{仪}} = \text{量程} \times \text{级别} \%$,它表示在该量程下正确使用仪器进行测量,结果可能出现的最大误差。而数字式电表测量结果的误差较为复杂,可在产品说明书和仪器手册中查到。

一般而言,有刻度的仪器、量具的最大允差大约对应于其最小分度值所代表的物理量。应当说明,最大允差是指所制造的同型号同规格的所有仪器中有可能产生的最大误差,并不表明每一台仪器的每个测量值都有如此大的误差。它既包括仪器在设计、加工、装配过程中乃至材料选择中的欠缺所造成的系统误差,也包括正常使用过程中测量环境和仪器性能随机涨落的影响。

实验时选取仪器要得当,仪器选取不当对仪器和实验均不利,选择仪器有两个最基本的指标:测量范围和精度,当被测量的值超出仪器的测量范围时,不仅无法测量,而且可能会损坏仪器;在满足精度的条件下,尽量选用精度较低的仪器。

1.2 不确定度

1.2.1 不确定度和置信概率

误差定义为测量值与真实值的偏差,但真值是无法测得的,因此误差也就无法得到。我们只能通过一定的方法对测量误差进行估计,这就需要引入不确定度的概念。不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度,是表征被测量的真值所处的量值范围的评定。我们在表示完整的测量结果时,除了给出被测量 X 的量值 x_0 ,同时要标出测量的总不确定度 Δ_x ,写成

$$X = x_0 \pm \Delta_x \quad (P = \rho) \quad (1-4)$$

的形式。括号内的 P 是一个表示可能性大小的概率, ρ 为具体概率值,称之为置信概率。表达式(1-4)的含义是:被测量 X 出现在区间 $(x_0 - \Delta_x, x_0 + \Delta_x)$ 内的概率为 ρ 。由式(1-4),我们可以将不确定度理解为一定概率下的误差限值。

为了反映测量值本身大小的影响,也常采用相对不确定度的概念。用 E_x 表示相对不确定度,则有

$$E_x = \frac{\Delta_x}{x_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

对不同的要求,置信概率可取不同的值,常见的取值有 0.68,0.90,0.95,0.99 等。国家技术监督局 1994 年建议,置信概率通常取 0.95,因此当 $P=0.95$ 时,不必注明 P 值。多数的工业和商业用途上所用的约定概率为 0.95。物理实验中置信概率取 95% 是合适的,也是必要的。

根据估计方法的不同,总不确定度可分为两类分量,一类是可以通过多次重复测量用统计

学方法估算出的 A 类不确定度 Δ_{xA} , 另一类是用其他方法估算出的 B 类不确定度 Δ_{xB} . 将两类分量按方和根的方法合成, 就得到测量结果的总不确定度

$$\Delta_x = \sqrt{\Delta_{xA}^2 + \Delta_{xB}^2} \quad (1-6)$$

需要指出的是, 目前国内外关于测量结果的不确定度的表述及运算规则还未完全统一, 有待于进一步的研究。

1.2.2 不确定度的估计和直接测量结果的表示

1. A 类不确定度 Δ_{xA} 的估计

在普通物理实验中对同一量做多次直接测量时, 一般测量次数 n 为不大于 10。只要 $n > 5$, 就可以直接取 $\Delta_{xA} = S_x$, 但标准偏差 S_x 与 A 类不确定度分量是两个不同的概念(实际上 $\Delta_{xA} = \frac{t_p(n-1)}{\sqrt{n}} S_x$, t_p 为与测量次数有关的参数), 由于同学们初次接触不确定度的概念。我们作上述最方便的简化处理。如果 Δ_{xB} 可忽略不计, 就有 $\Delta_x = \Delta_{xA} = S_x$, 这时就表明真值落在 $x \pm S_x$ 范围的可能性(概率)已大于或接近 95%。

当测量次数 $n < 5$ 时, 我们认为随机误差的分布意义不大, Δ_{xA} 的估计简化后一般采用误差绝对值合成的方法来求得, 即

$$\Delta_{xA} = \sum \delta_{x_i} = \sum |x_i - \bar{x}|, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1-7)$$

2. B 类不确定度 Δ_{xB} 的估计

测量中凡是不符合统计规律的不确定度统称为 B 类不确定度 Δ_{xB} 。物理实验中 B 类不确定度通常以测量仪器的最大允差 $\Delta_{仪}$ 和测量的估计误差 $\Delta_{估}$ 组成, 这也是一种方便、简化的处理方法。由于 $\Delta_{仪}$ 和 $\Delta_{估}$ 是互相独立的, 都不满足统计规律, 所以有

$$\Delta_{xB} = \sqrt{\Delta_{仪}^2 + \Delta_{估}^2} \quad (1-8)$$

若一个分量小于另一个分量的三分之一, 则上式可以忽略较小的分量。在物理实验教学中, 为简便起见, 非统计方法估计的 B 类不确定度 Δ_{xB} 直接用 $\Delta_{仪}$ 表示, 即

$$\Delta_{xB} = \Delta_{仪} \quad (1-9)$$

于是可得总不确定度 Δ_x 的具体计算式:

$$\Delta_x = \sqrt{S_x^2 + \Delta_{仪}^2} \quad (1-10)$$

在物理实验中, 经常遇到一些不能多次重复测量的情况, 如半导体热敏电阻的电阻值与温度关系的动态测量; 有时由于仪器精度较低, 多次测量结果可能完全相同, 如用千分尺测量量块, 随机性反映不出, 这时用统计方法计算出的 S_x 远远小于仪器误差 $\Delta_{仪}$, 多次测量失去意义。以上情况只能、也只需进行一次测量, 所以通常以 $\Delta_{仪}$ 表示一次测量结果的 B 类不确定度。此时总不确定度 Δ_x 可简单地用仪器误差 $\Delta_{仪}$ 来表示, 即

$$\Delta_x = \Delta_{仪} \quad (1-11)$$

注意, 这并不说明只测一次时的总不确定度 Δ_x 反而比测多次的 Δ_x 值小, 只说明 $\Delta_{仪}$ 与多次测量用的公式 $\sqrt{S_x^2 + \Delta_{仪}^2}$ 估计出的结果相差不大。如果经过分析或根据经验已知 $S_x \ll \Delta_{仪}$, 也可只进行一次测量, 并取 $\Delta_x = \Delta_{仪}$, 这并不说明不存在随机误差, 只说明仪器的分辨率太低而不足以反映微小差异, 显然取 $\Delta_x = \Delta_{仪}$ 是合理的。总之, 不管什么原因, 如果只进行了一次测量, 我们约定测量的总不确定度 Δ_x 就简单地取为仪器误差 $\Delta_{仪}$ 。

3. 总的不确定度的估计

当 $n \geq 5$ 次, 总的 uncertainty

$$\Delta_x = \sqrt{S_x^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (1-12)$$

相对 uncertainty

$$E_x = \frac{\sqrt{S_x^2 + \Delta_{\text{仪}}^2}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1-13)$$

当 $n < 5$ 次, 总的 uncertainty

$$\Delta_x = \sqrt{(\sum \delta_{x_i})^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (1-14)$$

相对 uncertainty

$$E_x = \frac{\sqrt{(\sum \delta_{x_i}^2) + \Delta_{\text{仪}}^2}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1-15)$$

如果因 $S_x < \Delta_{\text{仪}}/3$ 或因估计出的对实验最后结果的影响很小, 或因条件限制只进行了一次测量时, 可简单地用仪器的精度来表示, 即:

当 $n=1$ 次时, 总的 uncertainty

$$\Delta_x = \Delta_{\text{仪}} \quad (1-16)$$

相对 uncertainty

$$E_x = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1-17)$$

这并不说明只测一次比测量多次时 Δ_x 的值变小, 只说明 $\Delta_{\text{仪}}$ 比 Δ_{x_A} 大许多, 从而掩盖 Δ_{x_A} 的变化, $\Delta_{\text{仪}}$ 与 $\sqrt{\Delta_{x_A}^2 + \Delta_{\text{仪}}^2}$ 估算出来结果相差不大。

注: 用(1-13)、(1-15)、(1-17)式计算 E_x 时, 若已知 x 的公认值或理论值, 应用 $x_{\text{公认}}$ 或 $x_{\text{理}}$ 代替 \bar{x} 。

1.2.3 间接测量结果的计算和不确定度的合成

1. 间接测量结果的计算

设间接测量量与直接测量量具有 $Y=f(x_1, x_2, x_3, \dots)$ 的函数关系, x_1, x_2, x_3, \dots 为彼此独立的直接测量量, 可将直接测量量 x_1, x_2, x_3, \dots 的算术平均值 $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots$ 代入函数关系中, 即得间接测量结果

$$\bar{Y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots) \quad (1-18)$$

2. 间接测量量不确定度的合成

设 x_1, x_2, x_3 的 uncertainty 分别为 $\Delta_{x_1}, \Delta_{x_2}, \Delta_{x_3}$, 它们必然影响间接测量结果, 使 Y 的值也有相应的 uncertainty Δ_Y , 由于 uncertainty 都是微小的量, 相当数学中的“增量”, 因此间接测量的 uncertainty 的计算公式与数学中的全微分公式基本相同。考虑到 uncertainty 合成的统计性质, 我们用 Δ_Y 代替 dY , Δ_x 代替 dx , 且用方和根的方法合成,

当 $Y=f(x_1, x_2, x_3, \dots)$ 为和差的形式时, 用

$$\Delta_Y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta_{x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_3} \Delta_{x_3}\right)^2 + \dots}$$

$$E_Y = \frac{\Delta_Y}{\bar{Y}} \quad (1-19)$$

计算较为简单,即先求总的不确实度,再求相对不确定度;

当 $Y=f(x_1, x_2, x_3, \dots)$ 为积商的形式时,用

$$E_Y = \frac{\Delta_Y}{\bar{Y}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_1} \Delta_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_2} \Delta_{x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_3} \Delta_{x_3}\right)^2 + \dots}$$

$$\Delta_Y = E_Y \cdot \bar{Y} \quad (1-20)$$

计算较为简单,即先求相对不确定度,再求总的不确定度。

物理实验中常用函数不确定度的传递公式与标准差传递公式相同,当直接测量次数 $n < 5$ 次或一些简单的测量问题时,也可采用绝对值合成的方法,即

$$\Delta_Y = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta_{x_1} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta_{x_2} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_3} \Delta_{x_3} \right| + \dots \quad (1-21)$$

这种合成方法所得的结果一般偏大,与实际的不确定度合成可能有较大出入,但因其简单,在测量次数比较少时,或某些以系统误差为主的实验中(如大部分电学实验)可作为一种简化的处理方法。

1.2.4 有效数字

1. 有效数字的有关概念

由若干个正确数字和末一位欠正确(估读)数字组成的数字称为有效数字。例如用毫米刻度的米尺去测量一个物体的长度,毫米(包括毫米)以上的数位的读数为正确读数;毫米以下的一位数只能估读,包含估读数位的这个读数更能准确反映测量的真实值故称有效数字。有效数字后面的“0”是有效数字。注意测量中 $5.2 \text{ mm} \neq 5.20 \text{ mm}$,前者2是估读数字,后者2是准确数字,而“0”才是估读数。数值很大或很小时用科学记数法表示,例如, 25.30 mm 可以改写为 0.02530 m 或者 2.530 cm ,它们均为四位有效数字。在实际的数据处理中常把它写成 $a \times 10^N$ 的形式。其中 $1 \leq a < 10$, N 为整数,则上述有效数字可写成 $2.530 \times 10^{-2} \text{ m}$,这种记数方法称科学记数法。有效数字的位数与单位无关也即与小数点位置无关。

2. 有效数字的运算法则

总原则:准确数字与准确数字运算仍是准确数字;准确数字与可疑数字,可疑数字与可疑数字运算是可疑数字。

1) 加减运算时,结果的末位(可疑)数字所占数位与参与运算的各数据项中末位数字所占数位最高的相同。例如: $123.3 + 43.462 + 8.01 = 174.8$ 。

2) 乘除运算时,结果所包含有效数字位数与参与运算的各数据项中有效数字最少的那个相同。例如: $63.8 \div 1.2 = 53$ 。

3) 乘方,开方运算最后结果的有效数字位数一般与底数的有效数字位数相同。如:

$$\sqrt{32.8} = 5.73$$

4) 对于常数如 π, e 等,一般比测量值多取一位有效数字参加运算。

例如: $s = \pi R^2, R = 23.6 \text{ cm}$ 则取 $\pi = 3.142$ 。

5) 例如,计算 $\lg 7.356$ 的结果。因为:

$$\lg 7.356 = 0.866\ 641\ 72\dots$$

$$\lg 7.357 = 0.866\ 700\ 76\dots$$

可以看到两运算结果在小数点后第四位产生了差别,因此 $\lg 7.356 = 0.866\ 6$,最后一位6

是存疑数字。

3. 有效数字的取舍原则

为保证物理实验的置信概率(95%),一般采用放大的原则,即进位法。

1) 对数据运算结果,尾数取舍原则为:“小于五则舍,大于五则入,等于五则把尾数凑成偶数”。

2) 对测量不确定度,取舍原则是只入不舍。例如: $\Delta=0.34$ 取为: $\Delta=0.4$ 。

3) 间接测量结果的有效数字尾数与不确定度的尾数一般要对齐。

如:我们求得某物体的体积 $V=0.321\text{ m}^3$, 求得其不确定度 $\Delta_V=0.02\text{ m}^3$ 。则最终结果表示为: $V=(0.32\pm 0.02)\text{ m}^3$ 。

4) 不确定度的有效位数。

最终结果的不确定度一般取一位有效数字,当不确定度的第一位为 1、2 时常取两位;

最终结果的相对不确定度一般取两位有效数字。

1.3 数据处理方法

经过实验的测量得到一批数据,然而从这些数据中得出有意义的结果就必须经过正确的数据处理。数据处理是指从获得的数据得出结果的加工过程,包括记录、整理、计算、分析等,用简明而严格的方法把实验数据所含有的内在规律提炼出来。正确处理实验数据是实验能力的基本训练之一,也是物理实验的重要环节。根据实验的内容和要求,可以采用不同的数据处理方法。下面介绍物理实验中常用的数据处理方法。

1.3.1 列表法

列表法是物理实验中常用的一种基本方法。通过列表可以大致看出物理量之间的对应关系,可以较容易发现个别有错误的数字,为进一步处理数据创造了条件。表 1 所示给出了用伏安法测量电阻的应用实例。

表 1 伏安法测电阻

测量序号	电压/V	电流/mA
1	0	0
2	2.00	3.95
3	4.00	7.95
4	6.00	12.50
5	8.00	15.80
6	10.00	19.90

表中 12.50 为一明显的错误数据,应重测。

注意:名称、单位写在标题栏内;数据的有效数字应符合要求。