

大学物理 实验教程

主编 酆文忠 张 宁



科学出版社

大学物理实验教程

邴文忠 张 宁 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是依据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合应用型工科院校人才培养特色，并在总结多年教学实践的基础上编写而成的。全书包括绪论、测量误差和数据处理、基础物理实验、近代物理实验、综合性和设计性物理实验五个部分，内容涵盖力学、光学、电磁学、热学、近代物理等 48 个实验项目。每章内容均努力突出厚基础、重实践和强能力的特色，目的在于让学生学习物理实验知识、掌握实验方法、强化实验能力的同时，充分提升学生的创新意识和创新思维的培养，为学生今后研究能力、开拓能力、创新意识等综合科学素质的形成奠定基础。

本书可作为独立学院理工科各专业大学物理实验课程的教学用书，也可作为其他普通高等学校和高职高专院校大学物理实验课程教学指导书以及各级大学物理实验竞赛基础训练的培训教材，亦可供社会读者参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验教程 / 郇文忠, 张宁主编. —北京: 科学出版社, 2018.8
ISBN 978-7-03-058472-4

I. ①大… II. ①郇… ②张… 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 (2018) 第 180225 号

责任编辑: 李淑丽 张晓云 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 霍 兵 / 封面设计: 华路天然工作室

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>

北京市密东印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 8 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2018 年 8 月第一次印刷 印张: 17 1/4

字数: 420 000

定价: 43.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

大学物理实验是连接大学物理理论教学中感性认知和可触摸的实际实验、可操控的科学知识的桥梁。该课程作为高等院校理工科学生必修的第一门基础实验课程,是理工科学生接受高等教育以来得到全面系统的实验技能训练的良好开端,是后继专业实验课学习的基础,更是培养学生良好实验习惯、实验技能、实验素养的基础,以及今后研究能力、开拓能力、创新意识等综合科学素质的基础。

本教材根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》,针对独立学院理工科学生的实际,结合目前独立学院大学物理实验教学的现状和我院大学物理实验室近年的发展,总结了多年的一线实验教学经验和国内目前各级大学物理实验竞赛的基础教学需求,以“应用型”人才培养为目的编写而成。本教材的内容体系遵循循序渐进的原则,并结合物理实验的教学经验,分为“绪论”“测量误差和数据处理”“基础物理实验”“近代物理实验”及“综合性和设计性物理实验”五个部分,内容涵盖力学、光学、电磁学、热学、近代物理学等 48 个实验项目。每章内容均努力突出“厚基础”“重实践”和“强能力”的特色,既以加强基础训练为主,让学生在学习物理实验知识、掌握实验方法、强化实验能力等方面受到系统的训练,同时充分考虑到学科发展的新趋势,使教学更好地适应现代科学技术的发展。在实验内容上我们充分考虑了与现代流行的大学物理教材相匹配,并博采众大学物理实验教材之所长,力图做到开门见山、深入浅出、通俗易懂、便于操作。本教材主要用作独立学院理工科学生相关专业的大学物理实验教学用书,各理工类本科三批次院校可根据自身实际,选择若干实验进行开课,同时也可作为其他普通高等学校和高职高专院校的大学物理实验课程教学指导书,也可作为各级大学物理实验竞赛基础训练的培训教材。

本书编写由酆文忠、张宁主持。参加编写的老师有张宁、熊铁军、孙乃峰、慈佳祥、张小娟、曹中胜、李常杰、桂兵仪等。由张宁统稿。

本教材编写过程中参阅了许多院校的有关教材和精品课程网站以及实验室相关仪器指导书,在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中难免有不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

2018 年 3 月 14 日

目 录

前言	
绪论	1
第一章 测量误差和数据处理	4
第一节 测量和误差	4
第二节 有效数字	15
第三节 测量结果的表示	19
第四节 测量的不确定度	20
第五节 常用的数据处理方法	22
第二章 基础物理实验	28
实验一 三线摆测转动惯量	28
实验二 弹性模量的测定	32
实验三 密立根油滴实验	36
实验四 液体表面张力系数的测定	43
实验五 气垫导轨上的力学实验	46
实验六 金属线膨胀系数的测量	54
实验七 受迫振动的研究	57
实验八 惠斯通电桥测电阻	64
实验九 电势差计	68
实验十 伏安法测电阻	72
实验十一 金属电阻和热敏电阻温度特性的研究	73
实验十二 RLC 电路的暂态过程	77
实验十三 牛顿环和劈尖干涉	83
实验十四 分光计的调节与使用	90
实验十五 衍射光栅测波长	96
实验十六 双棱镜干涉实验	104
实验十七 薄透镜焦距的测定	109
实验十八 用分光计测定三棱镜的折射率	114
实验十九 模拟法测绘静电场	118
实验二十 硅光电池特性测试实验	124
实验二十一 示波器的使用	127
实验二十二 电子束的偏转和聚焦	136
实验二十三 用冲击法测螺线管磁场	142
实验二十四 非良导体热导率的测量	146
实验二十五 空气比热容比的测定	150

第三章 近代物理实验	154
实验一 声速的测定	154
实验二 光纤实验	159
实验三 多普勒效应综合实验	165
实验四 光电效应测定普朗克常量	169
实验五 用金属电子逸出功测定仪测定电子比荷	175
实验六 全息照相	176
实验七 塞曼效应	182
实验八 弗兰克-赫兹实验	189
实验九 核磁共振法测量弛豫时间	195
实验十 霍尔效应实验	200
实验十一 傅里叶变换-脉冲核磁共振测量液体的化学位移	207
实验十二 核磁共振的一维、二维成像	210
实验十三 光敏电阻特性测试实验	215
实验十四 迈克耳孙干涉仪的调节和使用	218
实验十五 偏振光的观测与研究	225
实验十六 半导体 PN 结的物理特性及弱电流测量实验	231
实验十七 LED 特性的测试研究	236
实验十八 磁电阻传感器特性的测量及应用	243
实验十九 铁磁材料磁滞回线和磁化曲线的测量	247
实验二十 用霍尔法测直流线圈与亥姆霍兹线圈的磁场	253
第四章 综合性和设计性物理实验	257
实验一 RC 串联电路相位差的测定	257
实验二 用电势差计校准电表	258
实验三 电表的改装和校准	259
附录	264

绪 论

物理学是一门实践性很强的学科，它是在实验和理论相互推动和密切结合下发展起来的。任何物理规律和物理理论的建立都以大量的物理实验为基础，并受到实验的检验，物理理论的建立和发展反过来又推动着物理实验的不断完善和进步。在当今科学技术飞速发展的社会，物理理论和物理实验的相互推动和密切结合，不仅使物理学的发展在它自身的学科体系内取得了重大进展，而且还发展出许多新兴学科、交叉学科。新技术学科与物理实验的思想、方法、技术和装置经常被用在自然科学研究和工程技术中。

一、大学物理实验课程的地位和作用

为了适应科学技术迅猛发展的需要，大学生必须具备坚实的物理基础、出色的科学实验能力和勇于开拓的创新精神。在这些基本素质和能力的培养方面，物理实验课程起着重要的作用。因此，在高等理工科院校中，物理实验是一门独立的、必修的基础课程。这门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，是理工科类专业学生进行科学实验训练的重要基础。

物理实验课程通过具体的实验项目，由浅入深、由简到繁地引导学生仔细观察物理现象，深刻理解实验思想，定量研究变化规律，分析、评定实验结果，从而使学生会基本的实验知识、实验方法和实验技能，培养和提高学生独立开展科学实验的素质和能力。因此，学好大学物理实验对高等理工科院校的学生十分重要。

二、物理实验课程的任务和要求

1. 物理实验课程的具体任务

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

(2) 培养和提高学生的科学实验能力，其中包括：能够通过阅读实验材料或资料，做好实验前的准备；能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器；能够利用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断；能够正确记录和处理实验数据，绘制曲线，说明实验结果，编写合格的实验报告；能够完成简单的具有设计性内容的实验。

(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作风，严肃认真的工作态度，主动研究的探索精神，遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的良好品德。

2. 物理实验课程的基本教学要求

通过物理实验的基本训练，学生应做到：

- (1) 能够自行完成预习、进行实验和编写实验报告等主要实验程序。
- (2) 能够调整常用实验装置,并基本掌握常用的操作技术。例如,零位调整;水平、铅直调整;光路的共轴调整;消视差调节;逐次逼近调节;根据给定的电路图正确接线等。
- (3) 了解物理实验中常用的实验方法和测量方法。例如,比较、放大、转换、模拟、补偿、平衡和干涉等方法。
- (4) 能够进行常用物理量的一般测量。例如,长度、质量、时间、热量、温度、电流强度、电压、电动势、电阻、磁感应强度、折射率等的测量。
- (5) 了解常用仪器的性能,并学会使用它们。例如,测长仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、直流电桥、直流电势差计、通用示波器、低频信号发生器、分光计、常用电源和常用光源。

三、物理实验课程的基本教学程序

物理实验教学是在物理实验室进行的,学生在教师的指导下,按教材的要求完成实验。为了避免一切不必要的错误,提高效率,完成预定实验目的,必须有准备、有计划地进行实验。为此,学生必须严格遵守下列实验课程的基本程序:

(1) 课前预习。这是实验的准备阶段。由于实验的时间有限,而要求熟悉的内容很多,因此每次实验前要认真阅读教材及有关参考书,搞清实验目的、原理和方法、需要使用哪些仪器、应自备什么物品、需要注意什么、实验的操作步骤等,这样才能有的放矢,避免忙乱和盲目做实验的现象。此外,还要按教师的要求写出预习报告或回答预习思考题,检查通过后方可进行实验。

(2) 实验进行。进入实验室后,应阅读黑板上或实验桌上的通知和注意事项;听教师做启发性讲解,应特别注意没有搞清楚的地方和书上没有的内容,或者实验必须遵守的特殊规定;逐一辨认和清点实验用具,了解仪器使用和保护的方法;按要求调整仪器,连接电路(凡电学实验,必须经教师检查电路后,才能接通电源)。观察现象,记录数据;下课前请教师检查实验数据,并签字认可;清理仪器和用具,一切恢复原状后,方能离开实验室。

(3) 实验记录。实验记录是进行实验和编写报告的原始资料,是一切认识、推论、设想和验证工作的依据,十分重要,因此有必要特别强调。实验记录包括以下内容:

- ① 实验名称和实验目的,简要说明做什么。
- ② 实验的日期、地点和实验者姓名、学号、同组实验者姓名,以便以后核对。
- ③ 使用的仪器类型、编号和连接示意图;装置的结构图以及每个部件详细、准确的工作状态。
- ④ 工作条件,包括天气、温度、湿度、电源电压等。
- ⑤ 实验数据,以表格方式认真、清楚、工整地记录每一个数据。
- ⑥ 实验完成,关闭仪器之前,要仔细核对有关参数,包括时间、地点、操作者和仪器工作状态等。实验数据不允许涂改,若确实有误,应重新测量,并详细说明出现错误的原因。整个实验记录要做到清晰、整齐、美观。

(4) 编写实验报告。实验报告是实验工作的全面总结。一份好的实验报告应当是完整、

简明扼要、突出重点、字迹工整的。完整的实验报告通常包括实验目的、原理、实验仪器、步骤、数据记录及数据处理、计算或作图、误差、实验讨论等内容。数据记录及数据处理部分是报告最主要的部分，没有这部分就等于没有做实验。原始数据必须准确，切勿遗漏。误差要有依据，不能只有数字，把数据尽可能列成表格。要简明扼要地叙述实验原理和步骤，应写出那些关键的地方或应特别注意之处。实验报告在实验后两天内交给任课实验教师。

四、物理实验室的规则

- (1) 学生进入实验室须带上实验数据记录纸和预习报告，完成指定的课前预习内容，经教师检查同意才可进行实验。
- (2) 遵守课堂纪律，保持安静的实验环境。
- (3) 爱护仪器，进入实验室不能擅自搬弄仪器；实验中要严格按照要求操作，仪器若有损坏，照章赔偿。借公用工具必须签字，用完后立即归还。
- (4) 做完实验，学生应将仪器整理还原，将实验桌面和凳子收拾整齐，经教师检查原始数据和仪器还原并签字后，方能离开实验室。

第一章 测量误差和数据处理

第一节 测量和误差

一、测量

所谓测量，是指用实验的方法，将被测量(未知量)与已知的标准量进行比较，以得到被测量大小的过程。它是对被测量定量认识的过程。根据测量方式的不同，测量可分为两类。

1. 直接测量

所谓直接测量就是直接将被测量(未知量)与已知的标准量进行比较，得到被测量的数据，如用米尺测量长度、用安培计测量电流、用停表测量时间、用温度计测量温度等。

2. 间接测量

通过测量与被测量有函数关系的其他量，才能得到被测量值的测量方法称为间接测量法。有些物理量无法直接和标准量进行比较或者比较起来比较麻烦，从而无法获得数据，这时就需要间接测量。例如，通过测量矩形的边长 L_1 、 L_2 确定面积，通过测量圆柱状导体的电压 U 、电流 I 、长度 L 和半径 R 确定电阻率，通过测量振动周期 T 和摆长 L 确定重力加速度 g 。

二、误差与偏差

在测量工作中，由于各种因素的影响，对某量(如某一个角度、某一段距离或某两点间的高度差等)进行多次观测时，所得的各次观测结果总是存在着差异，这种差异实质上表现为每次测量所得的观测值与该量的真值之间的差值，这个差值称为真误差，即

$$\text{测量误差}(\Delta) = \text{真值} - \text{观测值}$$

真值即真实值，是指在一定条件下被测量客观存在的实际值。真值在不同场合有不同的含义。

理论真值也称绝对真值，如平面三角形内角之和恒为 180° 。

约定真值：国际上公认的某些基准量值，如 1982 年国际计量局召开的米定义咨询委员会会议提出新的米定义为“米等于光在真空中 $1/299792458$ s 时间间隔内所经路径的长度”。这个米基准就当做计量长度的约定真值。

相对真值：计量器具按精度不同分为若干等级，上一等级的指示值即为下一等级的真值，此真值称为相对真值。例如，在力值的传递标准中，用二等标准测力计校准三等标准测力计，此时二等标准测力计的指示值即为三等标准测力计的相对真值。

约定真值：被测量的算术平均值和公认值。

一般来说,物理实验的真值是不知道的,我们常用约定真值来代替真值。测量值与约定真值之差叫做偏差。

误差和偏差是有区别的,但当多次测量时,偏差接近于误差。为方便起见,在以后的讨论中我们不区分偏差和误差,统称为误差。

三、误差的分类

误差的产生有多方面的因素。根据误差的性质和产生的原因,可以将误差分为系统误差和偶然误差两种。

1. 系统误差

系统误差是指在同一条件下多次测量同一物理量时,误差的大小和符号都保持不变,或当条件改变时,误差按某一确定的已知规律变化。

系统误差是由仪器制造或校正不完善、观测员的生理习性、测量时的外界条件、仪器检定时不一致等原因引起的。在同一条件下获得的观测值中,其数据、符号或保持不变,或按一定的规律变化。系统误差在观测成果中具有累计性,对成果质量影响显著,所以实验员应在观测中采取相应措施予以消除。

消除系统误差的常用方法主要有以下两种。

1) 从误差来源上消除系统误差

这是解决系统误差的根本方法。例如,对测量仪器要求调整好才能正常工作的,必须先按要求把它调整好,各种电表在使用前应当调准零点。再如,有“零差”的仪器,必须对其读数进行校准;对有空程的螺旋仪器必须消除螺距差;对测量方法不完善或理论依据不严密的必须做出修正等。

由实验者本人引起的个人误差,则应在实验中不断总结经验,提高实验素养,尽可能地减小系统误差。

2) 应用测量技术消除系统误差

替代法:在一定的条件下,用某一已知的标准量替换被测量,以消除系统误差。例如,为消除天平两侧不等长带来的系统误差,可将被测物与媒介物分别置于天平的砝码盘和物盘上,使之平衡。然后再以砝码替换被测物使天平指示平衡。如果在替换过程中其他条件都没有改变,则被测物的质量就等于砝码的质量。

对换测量法:将测量中的某些条件(如被测物的位置)交换,使产生系统误差的原因对测量结果起相反的作用,从而抵消系统误差。例如,用滑线电桥测电阻时,将被测电阻与标准电阻交换位置测量,以消除接触电阻和电阻丝不均匀带来的误差。

异号法:使系统误差在测量中出现两次,两次的符号相反,取平均值作为测量结果可消除系统误差。例如,在拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量实验中,加砝码与减砝码各记一次,取平均值可消除因摩擦等产生的系统误差。

半周期偶次观测法:对于按正弦曲线变化的周期性系统误差,可采用在相差半个周期处同时测两个值来表示相应的角位置,最后以各自算出的角度的平均值作为测量结果,就可消除这种系统误差。例如,分光计就采用这种方法消除因“偏心”引起的周期性系统误差。

系统误差的发现、减小和消除是一个比较复杂的问题,实验者只有在实验中不断总结经验,努力提高自己的业务水平,才能设法在测量结果中减小和消除系统误差的影响。

2. 偶然误差

偶然误差也称为随机误差,是指消除系统误差后,仍然存在的一种误差,这种误差多是一些尚未十分明确又暂时不能控制的、微小因素等综合作用的结果。因其产生原因不详,故也就不易控制或消除。偶然误差有时大有时小,有时正有时负,方向不定,但具有统计规律,而且在大多数情况下是服从正态分布的。

产生偶然误差的原因很多,如判断的起伏、涨落情况、实验和测量过程中各种外界因素的干扰、被测量本身的不确定等因素的影响,难以确定某个因素产生的具体影响的大小。

对于每次测量来说,偶然误差的出现是没有规律的,也是不可预知的,但是如果测量次数足够多,就会发现偶然误差服从一定的统计规律,即各种大小、符号不同的偶然误差的出现有确定的概率(可能性)。偶然误差服从的统计规律叫做高斯分布规律,如图 1-1-1 所示。 Δ 表示偶然误差, $f(\Delta)$ 表示与偶然误差出现概率有关的函数。

由高斯分布曲线可知,偶然误差服从下面的统计规律。

(1) 对称性:绝对值相等的正的和负的误差出现的概率相同。

(2) 单峰性:绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。

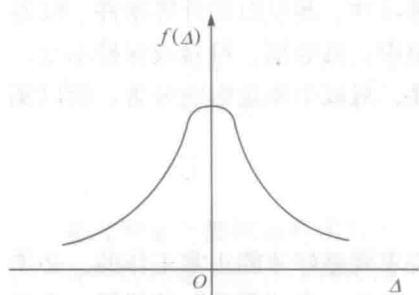


图 1-1-1 高斯分布曲线

(3) 有限性。在一定测量条件下,偶然误差的绝对值不会超出一定的范围。
(4) 抵偿性:随着测量次数的增加,偶然误差的算术平均值趋近于零。
(5) 测量中的偶然误差是不可避免的,但我们根据它的统计规律知道:①采用多次测量可减小偶然误差的影响;②可以对偶然误差做合理的统计。

3. 粗大误差

粗大误差也就是错误数据,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。产生粗大误差的原因多是由人员失误或实验条件不符合规定造成的。这类误差在数据处理过程中应依照一定的判据剔除掉。

总的来说,误差的大小表示测量结果接近真值的程度。

四、测量结果的评定

在对物理量进行测量后,通常用精密度、准确度和正确度评定测量结果。

(1) 精密度:描述测量可重复性的程度,是指重复测量所得结果相互接近的程度。它反映了随机误差的大小,测量的精密度高,测量数据比较集中,则测量的重复性好,各次测量结果误差的分布密集,随机误差较小。因此,精密度反映了随机误差对测量影响的大小,可由测量仪器的最小测量单位确定。在用精密度描述测量结果时,系统误差的大小不明确。

(2) 准确度：是指测量值与真值之间的符合程度。它综合反映了系统误差和随机误差的大小，测量的准确度高，测量数据的平均值偏离真值较小，测量结果与真值接近的程度好，测量结果的系统误差和随机误差都小。

(3) 正确度：也叫精确度，是对测量的系统误差的综合评定，是综合评定测量结果的重复性与接近真值的程度的。测量的精确度高，测量数据集中在真值附近，即测量的系统误差比较小。在用精确度描述测量结果时，偶然误差的大小不明确。

下面用打靶时子弹打在靶上的分布来说明精密度、准确度和正确度这三个概念，如图 1-1-2 所示。



图 1-1-2 测量的精密度、准确度和正确度的图示

五、直接测量的误差估计

根据数理统计理论，我们可以对测量的最佳值和偶然误差做一个合理的估计。首先我们假定：系统误差已尽可能地消除或减小，或做了修正，由于实验者粗心大意或操作不当造成的错误数据已剔除。

1. 多次测量的误差

1) 以算术平均值作为测量的最佳值

由于偶然误差的存在，多次重复测量时每一次的测量值都有区别，那么什么样的值才是测量的最佳值呢？理论证明，在进行有限次数测量时，算术平均值是最接近真值的。在测量方法正确的前提下，当测量次数无限增加时，算术平均值无限接近于真值。所以我们用算术平均值作为测量的最佳值。

设某一物理量 X ，在同一实验条件下对 X 进行 k 次测量，测量值分别为 $X_1, X_2, \dots, X_k$ ，这些测量值的算术平均值则为

$$\bar{X} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_i \quad (1-1-1)$$

2) 以标准偏差或算术平均误差估算偶然误差

算术平均值的标准偏差(简称标准差)用 $S_{\bar{x}}$ 表示， $S_{\bar{x}}$ 的计算公式为

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

式中，

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

标准差也称为贝塞尔公式。

算术平均误差用 $\overline{\Delta x}$ 表示。 $\overline{\Delta x}$ 的计算公式为

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |x_i - \bar{x}| = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |\Delta x_i| \quad (1-1-3)$$

式中,

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$$

叫第 i 次测量的绝对误差, Δx_i 是有符号的。

算术平均值的标准差 $S_{\bar{x}}$ 和算术平均误差 $\overline{\Delta x}$ 都是有单位的, 它们的单位与测量值 x 的单位相同。

有时还需要用相对误差表示结果。相对误差 E_S 与标准差 $S_{\bar{x}}$ 的函数关系为

$$E_S = \frac{S_{\bar{x}}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1-1-4)$$

相对误差 E_S 与算术平均误差 $\overline{\Delta x}$ 的函数关系为

$$E_{\Delta x} = \frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1-1-5)$$

算术平均值的标准差和算术平均误差都可以表示偶然误差的大小, 也就是说都可以表示测量精密度的高低, 但标准差具有的统计意义更明确, 稳定性较好($S_{\bar{x}}$ 随次数 k 的变化较小), 具有与个别误差的符号无关、能反映测量数据离散情况等优点, 所以国际上均用它表示测量的精密度。在基础物理实验教学中, 为计算上的简便, 可采用算术平均误差表示测量的精密度。标准差和算术平均误差只算其中之一即可。

例 1-1-1 单摆实验中用米尺对摆长 l 测量了 10 次, 数据如下:

1.0056m, 1.0058m, 1.0054m, 1.0053m, 1.0059m, 1.0055m, 1.0057m, 1.0058m, 1.0056m, 1.0057m。

计算其算术平均误差和标准差。

$$\begin{aligned} \text{解 } \bar{L} &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k L_i \\ &= \frac{(1.0056 + 1.0058 + 1.0054 + 1.0053 + 1.0059 + 1.0055 + 1.0057 + 1.0058 + 1.0056 + 1.0057)}{10} \\ &= 1.0056(\text{m}) \end{aligned}$$

$\Delta L_1 = 0$, $\Delta L_2 = 0.0002$, $\Delta L_3 = -0.0002$, $\Delta L_4 = -0.0003$, $\Delta L_5 = 0.0003$, $\Delta L_6 = -0.0001$, $\Delta L_7 = 0.0001$, $\Delta L_8 = 0.0002$, $\Delta L_9 = 0$, $\Delta L_{10} = 0.0001$ 。

$$\begin{aligned} \overline{\Delta L} &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |\Delta L_i| \\ &= (0 + 0.0002 + 0.0002 + 0.0003 + 0.0003 + 0.0001 + 0.0001 + 0.0002 + 0 + 0.0001) / 10 \\ &= 0.0002(\text{m}) \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^{10} (L_i - \bar{L})^2 = (0+4+4+9+9+1+1+4+0+1) \times 10^{-8} (\text{m}^2) = 3.3 \times 10^{-7} (\text{m}^2)$$

$$S_{\bar{L}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (L_i - \bar{L})^2}{k(k-1)}} = \sqrt{\frac{33 \times 10^{-8}}{10 \times (10-1)}} = 0.0001 (\text{m})$$

2. 单次测量的误差

由于条件限制, 或者不必进行多次测量, 我们对物理量 x 只测量一次, 测量的最佳值就是该次测量值 x , 测量的误差 Δx 是该单次测量的最大误差, 一般取仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 作为单次测量的误差, 即

$$\Delta x = \Delta_{\text{仪}} \quad (1-1-6)$$

仪器误差可按下面几种方法估计:

(1) 仪器标注了示值误差或标准误差, 则仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 就取示值误差或标准误差。例如, 量程在 150mm 以下的游标卡尺, 按国家标准规定, 示值误差等于分度值, 所以如果一把游标卡尺的分度值为 0.02mm, 则 $\Delta_{\text{仪}} = \pm 0.02\text{mm}$ 。又如, 实验室常用的螺旋测微器, 测量范围是 0 ~ 25mm, 分度值是 0.01mm, 按国家标准规定, 示值误差为 $\pm 0.004\text{mm}$, 那么 $\Delta_{\text{仪}} = \pm 0.004\text{mm}$ 。

(2) 仪器标注了准确度等级, 则仪器误差为

$$\Delta_{\text{仪}} = \pm \text{量程} \times \text{准确度等级}\% \quad (1-1-7)$$

例如, 量程为 3A 的电流表, 准确度等级为 1.5 级, 这只电表的仪器误差为 $\Delta_{\text{仪}} = \pm 3 \times 1.5\% = \pm 0.05\text{A}$ 。

(3) 能连续读数的仪器, 这种仪器能在分度值以下进行估读, 仪器误差取分度值的一半, 即

$$\Delta_{\text{仪}} = \frac{1}{2} \times \text{分度值} \quad (1-1-8)$$

如米尺, 分度值为 0.1cm, $\Delta_{\text{仪}} = \frac{1}{2} \times 0.1\text{cm} = 0.05\text{cm}$ 。

(4) 不能连续读数的仪器(如停表、数字式仪表等只能读到分度值或最小单位的仪器), 仪器误差取分度值或最小单位, 即

$$\Delta_{\text{仪}} = \text{分度值} \quad \text{或} \quad \Delta_{\text{仪}} = \text{最小单位} \quad (1-1-9)$$

例如, 电子秒表能读出的最小单位是 0.01s, 则 $\Delta_{\text{仪}} = 0.01\text{s}$ 。

单次测量的标准差, 可按下式计算:

$$S_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (1-1-10)$$

六、间接测量的误差

设直接测量量 $x, y, z, \dots$ 是彼此独立的物理量, 间接测量量 N 是 $x, y, z, \dots$ 的函数, 则有

$$N = f(x, y, z, \dots) \quad (1-1-11)$$

1. 间接测量的最佳值 $\bar{N}$

间接测量量 N 的算术平均值就是测量的最佳值。可以证明

$$\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) \quad (1-1-12)$$

上式表明, 将各直接测量量的算术平均值代入函数关系式就可以求出间接测量量的算术平均值。

例 1-1-2 用单摆测定重力加速度 $g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2}$ 。已知 $\bar{T} = 2.000\text{s}$, $\bar{L} = 1.000\text{s}$, 求 $\bar{g}$ 。

$$\text{解 } \bar{g} = 4\pi^2 \frac{\bar{L}}{\bar{T}^2} = 4 \times (3.1416)^2 \times \frac{1.000}{(2.000)^2} = 9.870(\text{m/s}^2)$$

2. 间接测量的误差传递公式

由于 N 是根据 $x, y, z, \dots$ 直接测量的量按一定的函数关系算出来的, 而 $x, y, z, \dots$ 有误差, 所以 N 必然也有误差, 这就是误差的传递。 N 的误差与 $x, y, z, \dots$ 的误差的函数关系有关, 反映 N 的误差与 $x, y, z, \dots$ 的误差的函数关系式叫误差传递公式。计算间接测量量 N 的误差要用误差传递公式。

1) 算术平均误差传递公式

对式(1-1-11)求全微分有

$$\mathrm{d}N = \frac{\partial f}{\partial x} \mathrm{d}x + \frac{\partial f}{\partial y} \mathrm{d}y + \frac{\partial f}{\partial z} \mathrm{d}z + \dots$$

此式表明, 当 $x, y, z, \dots$ 有微小改变 $\mathrm{d}x, \mathrm{d}y, \mathrm{d}z, \dots$ 时, N 改变 $\mathrm{d}N$, 由于误差远小于测量值, 用 $\Delta N, \Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots$ 分别代替 $\mathrm{d}N, \mathrm{d}x, \mathrm{d}y, \mathrm{d}z, \dots$, 同时考虑到误差可能出现的最大值, 上式右边各项均取绝对值, 就得到误差传递公式, 即

$$\Delta N = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \Delta y + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \Delta z + \dots \quad (1-1-13)$$

有时对式(1-1-11)取对数后再求全微分, 可以得到用相对误差表示的传递公式, 即

$$\ln N = \ln f(x, y, z, \dots)$$

全微分得

$$\frac{\mathrm{d}N}{N} = \frac{\partial \ln f}{\partial x} \mathrm{d}x + \frac{\partial \ln f}{\partial y} \mathrm{d}y + \frac{\partial \ln f}{\partial z} \mathrm{d}z + \dots$$

将 $\mathrm{d}N, \mathrm{d}x, \mathrm{d}y, \mathrm{d}z, \dots$ 替换为 $\Delta N, \Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots$, 并合并同误差项, 取绝对值相加得

$$E_{\Delta N} = \frac{\Delta N}{N} = \left| \frac{\partial \ln f}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial y} \right| \Delta y + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial z} \right| \Delta z + \dots \quad (1-1-14)$$

式(1-1-13)适用于加减形式的函数, 式(1-1-14)适用于乘除形式的函数。

例 1-1-3 设函数关系为 $N = x \pm y$, x 和 y 的误差分别为 Δx 和 Δy , 求 N 的误差传递公式。

解 $\frac{\partial f}{\partial x} = 1, \quad \frac{\partial f}{\partial y} = 1$

根据式(1-1-13)得

$$\Delta N = \Delta x + \Delta y$$

由此可得

$$E_{\Delta N} = \frac{\Delta N}{N}$$

例 1-1-4 设函数关系为 $N = xy$, x 和 y 的误差分别为 Δx 和 Δy , 求 N 的误差传递公式。

解 对 $N = xy$ 取对数得

$$\ln N = \ln x + \ln y$$

求全微分

$$\frac{dN}{N} = \frac{dx}{x} + \frac{dy}{y}$$

将微分符号换算成误差

$$E_{\Delta N} = \frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$$

由此得

$$\Delta N = E_{\Delta N} \cdot N$$

2) 标准差传递公式

用标准差表示的误差传递公式为

$$S_{\bar{N}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 S_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 S_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 S_z^2 + \dots} \quad (1-1-15)$$

和

$$E_S = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 S_x^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 S_y^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\right)^2 S_z^2 + \dots} \quad (1-1-16)$$

由式(1-1-15)和式(1-1-16)可以看出, 只要将算术平均误差的传递公式(1-1-13)和式(1-1-14)中的 Δ 换成标准差 S , 并且将各项的平方相加, 最后开方, 就可得到标准差的传递公式。

例 1-1-5 设函数关系为 $N = x \pm y$, 求标准差传递公式。

解 $N = x \pm y, \quad \Delta N = \Delta x + \Delta y$

则

$$S_N = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$$

$$E_S = S_N / N$$

例 1-1-6 设函数关系式为 $N = xy$, 求标准差传递公式。

解 $N = xy, \quad \frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$