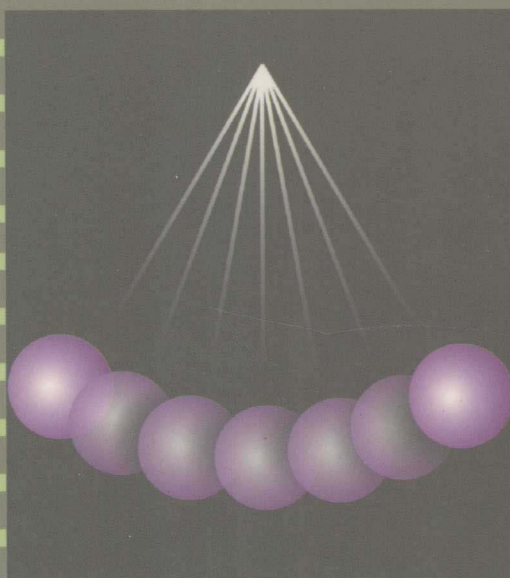


方晓懿 主编

大学 物理 实验



电子工业出版社

大学物理实验

方晓懿 主编

内容提要

本书是根据全国工科物理实验课程指导组 1995 年制定的教学基本要求,以成都理工学院使用多年的实验讲义为基础编写的。

本书介绍了误差(含不确定度)与数据处理的基本知识、物理实验预备知识;收集了 26 个实验项目,按基础物理实验、近代物理和综合性实验、设计性实验的顺序编排,并在某些实验后配有阅读材料,专门介绍实验史和物理实验知识在工程技术中的应用;还配有物理的法定计量单位、常用物理量的参考值等附表。

本书可作为高等工科院校各专业的物理实验教材和教学参考书,也可供职工大学、函授大学等选用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 方晓懿主编. — 成都:电子科技大学出版社, 2001.2
ISBN 7-81065-624-4

I. 大... II. 方... 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 03027 号

大学物理实验

方晓懿 主编

出版:电子科技大学出版社(成都建设北路二段四号,邮编:610054)

责任编辑:许宣伟

发行:新华书店经销

印刷:电子科技大学出版社印刷厂

开本:787mm × 1092mm 1/16 印张 12.75 字数 302 千字

版次:2001 年 1 月第一版

印次:2006 年 7 月第三次印刷

书号:ISBN 7-81065-624-4/O · 25

印数:6001 ~ 7000 册

定价:12.00 元

前 言

本书是根据全国工科物理实验课程指导组制定的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求(1995年修订版)》,以成都理工学院使用多年的大学物理实验讲义和近代物理实验讲义为基础编写的。

本书第一章介绍了误差和数据处理的基本知识;第二章是物理实验预备知识,包括力学实验、电磁学实验、光学实验和设计性实验的预备知识,并配有练习题,供学生实验前复习或自学;第三章至第五章是实验项目,根据循序渐进,先易后难的原则,按基础实验、近代物理和综合性实验、设计性实验编排,每个实验后面都配有预习题和复习思考题。本书还编写了一些选学和选做内容,以利因材施教,例如“实验的不确定度”、“电桥的灵敏度”等。

本书在某些实验后面配有阅读材料,专门介绍物理实验史和物理实验知识在工程技术中的应用,为全面贯彻“教学基本要求”进行了有益的尝试。

实验教材的编写离不开教学经验的积累和实验室的建设发展,本书是二十多年来几十位教师和实验技术人员智慧和劳动的结晶,是一项集体的成果。参加过原实验讲义编写工作的主要人员有伍钧、谢惠伦、林孔端、王志美、王湘乾、方晓懿、代锦辉、张勋友等同志。原讲义曾经过多次修改和铅印,这次出版,选编了原讲义中的21个实验,增加了一个综合性实验、4个设计性实验和7篇阅读材料。并对原讲义的基本体系作了较大幅度的改编,对内容和文字作了补充和修订。参加这次改编和修订工作的是方晓懿(结论、第一章、第二章、实验一~十、十五~十七、二十一、二十三、二十四、二十六、阅读材料1、2、3、4、6、附表)、代锦辉(实验十一~十四、二十、二十五)、杨培林(实验十八、二十二、阅读材料5、7)、王志(实验十九)。本书由方晓懿组织编写并统稿,彭直兴绘图。

本书在编写过程中参阅了许多兄弟院校的有关教材,并作了个别引用,在此表示衷心的感谢。

感谢电子科技大学出版社和成都理工大学王元君等同志在本书编辑和出版过程中给予的大力支持和帮助。

由于编者水平有限,经验不足,书中难免有缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者
2000年4月

目 录

绪论	(1)
第一章 测量误差和数据处理	(5)
§ 1 测量和误差	(5)
§ 2 有效数字	(16)
§ 3 测量结果的表示	(19)
§ 4 测量的不确定度	(20)
§ 5 常用数据处理方法	(23)
§ 6 计算器在数据处理中的应用	(28)
第二章 物理实验预备知识	(33)
§ 1 力、热学实验预备知识	(33)
阅读材料 1 长度计量和长度测量方法	(41)
§ 2 电磁学实验预备知识	(45)
§ 3 光学实验预备知识	(57)
§ 4 设计性实验预备知识	(63)
第三章 物理实验项目	(67)
基础物理实验	(67)
实验一 三线摆测转动惯量	(67)
实验二 弹性模量的测定	(71)
实验三 液体粘度系数的测定	(76)
实验四 密度的测定	(79)
实验五 惠斯登电桥测电阻	(83)
实验六 电表的改装与校准	(89)
实验七 电势差计	(92)
实验八 静电场的测绘	(100)
阅读材料 2 现代模拟技术	(103)
实验九 长直螺线管内轴线上的磁场测定	(106)
实验十 电容的测定	(110)

实验十一 示波器的使用	(113)
实验十二 双电桥测低电阻	(121)
实验十三 用分光计测玻璃三棱镜的折射率	(124)
实验十四 用分光计观测衍射光栅的分光现象并测定光波波长	(128)
阅读材料 3 光栅及其应用	(132)
实验十五 牛顿环和劈尖干涉	(136)
阅读材料 4 干涉现象的应用	(140)
实验十六 双棱镜	(146)
实验十七 薄透镜焦距的测定	(150)
近代物理和综合性实验	(155)
实验十八 迈克耳逊干涉仪	(155)
阅读材料 5 迈克耳逊干涉仪的由来	(159)
实验十九 霍耳效应	(162)
阅读材料 6 从霍耳效应到分数量子霍耳效应	(168)
实验二十 声速的测定	(171)
实验二十一 温差电偶	(176)
实验二十二 密立根油滴实验	(179)
阅读材料 7 电子电荷测量的历史沿革	(185)
设计性物理实验	(187)
实验二十三 测量不规则物体的密度	(187)
实验二十四 伏安法测电阻	(188)
实验二十五 电势差计的应用	(190)
实验二十六 双踪示波器的应用	(191)
附录	(193)

绪 论

一、物理实验课程的地位和作用

物理学是一门实验科学。物理学的发展是在实验和理论两方面相互推动和密切结合下进行的。纵观物理学的发展史可以知道,任何物理规律和物理理论的建立都是以大量物理实验为基础,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重大进展,而且还发展出许多新兴学科、交叉学科和新技术学科、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。

为了适应科学技术迅猛发展的需要,未来的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。在培养学生在这些基本素质和能力方面,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,是工科类专业对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工科院校的学生是十分重要的。

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:能够通过阅读实验教材或资料,作好实验前的准备;能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器;能够运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优良品德。

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,要求学生做到:

(1)能够自行完成预习、进行实验和编写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。

(5)了解常用仪器的性能,并学会使用方法。例如:测长仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、直流电桥、直流电位差计、通用示波器、低频信号发生器、分光计、常用电源和常用光源等。

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,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,需要使用那些仪器,应自备什么物品,需要注意些什么,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。还要按指导教师的要求写出预习报告或答出预习思考题,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,注意事项;听指导教师作启发性讲解,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;逐一辨认和清点仪器用具,了解仪器使用和保护方法;按要求调整仪器,联接电路(凡电学实验,必须经教师检查电路,才能接通电源)。观察现象,测读和记录数据;请指导教师检查实验数据,最后经教师认可签字;清理仪器和用具,一切恢复原状,方能离开实验室。

3. 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的,简明扼要,突出重点,字迹工整。完整的实验报告通常包括实验目的、原理、器具及仪器、步骤、数据及数据处理、计算或作图、误差、实验讨论等内容。突出重点主要指数据记录及处理部分,它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,数据尽可能列成表格。简明扼要,主要体现在原理和步骤两部分,原理想应包括那些理论根据及它们的互相联系、采取方法的优点、主要公式和

结论等,步骤应写那些关键地方或特别注意之点,如果忽略这些地方就可能走弯路或发生困难。教材或讲义是用来指导初学者实验用的,自然要详细得多,而报告是给熟悉情况的内行看的,因此切勿照抄教材。总之要做到简明扼要,必须要抓住要点,要抓住重点必须多思考。一般来说,实验报告包括以上内容,但不是每个报告都是千篇一律照此办理,而是按具体情况灵活掌握,有取有舍。

实验报告的格式参见附录。

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,完成指定的课前预习内容,经教师检查同意方可进行实验。
2. 遵守课堂纪律,保持宁静的实验环境。
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,借计算器还须带证件,用完后立即归还原处。
4. 做完实验,学生应将仪器整理还原,将桌面和凳子收拾整齐。经教师检查原始数据和仪器还原情况并签字后,方能离开实验室。
5. 实验报告在下一次做实验时交指导教师。

附录

成都理工学院物理实验报告

班号_____姓名_____同次实验者_____实验日期_____
实验名称 用静力称衡法测定不规则物体的密度 仪器组号_____评分_____

[实验目的]

1. 熟悉物理天平的结构,掌握物理天平的使用方法。
2. 用称衡法测形状不规则物体(铜块)的密度。
3. 测密度小于水的固体(石蜡)的密度。

[仪器用具]

物理天平(写出规格)、玻璃烧杯、待测物体、细线等。

[原理]

(写出该方法的理论依据、优点、主要公式及其适用条件等,画出装置图或电路图,或光路图)

[步 骤]

(根据实际实验过程,写出关键的步骤或特别注意的地方)

[数据及其处理]

1. 金属块密度的测定

环境温度 _____ °C

水密度 _____ g/cm³

天平分度值 _____ g

最大称量 _____ g

次 数	1	2	3	4	5		平均
测量值							
$m(g)$							
$\Delta m(g)$							
$m_1(g)$							
$\Delta m_1(g)$							
$\rho = \rho \pm \Delta \rho (g/cm^3)$							

附:误差公式及计算过程

2. 石蜡密度的测定

次 数	1	2	3	4	5		平均
测量值							
$m'(g)$							
$\Delta m'(g)$							
$m_2(g)$							
$\Delta m_2(g)$							
$m_3(g)$							
$\Delta m_3(g)$							
$\rho = \rho \pm \Delta \rho (g/cm^3)$							

附:误差公式及计算过程

[思考问题或讨论]

第一章 测量误差和数据处理

物理实验研究的内容一般包括三部分,其一是物理现象的再现,其二是测量并获得实验数据,其三是对测量进行误差分析和数据处理。可见,误差分析和数据处理是物理实验的一个重要组成部分。

§ 1 测量和误差

一、测量

测量就是把待测物理量和一个被选作标准的同类物理量进行比较的过程,找出待测量是标准量的多少倍,这个倍数再带上单位便是实验数据。根据测量方式的不同测量可分两类:

1. 直接测量

所谓直接测量就是把待测量与标准量直接进行比较,直接得到数据。如用米尺测量长度、用停表测量时间、用安培计测量电流、用温度计测量温度等等。

2. 间接测量

有些物理量无法直接和标准量进行比较或者比较起来不方便,而无法直接获得数据,这就需要间接测量。如测量实验室面积,自然可以用单位面积之比较,但直接量出长和宽求积更方便,“长”“宽”就是直接测量的量,面积就是间接测量的量。又如我们无法直接测得重力加速度,但是利用单摆,通过单摆振动周期 T 和摆长 l 的直接测量,引用 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 或 $g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$ 的关系,通过运算可以得到。因此间接测量就是直接测量某些物理量后通过某些物理规律或公式计算出来的量,也可以说测出直接测量的量后,通过某些函数关系求得的量称为间接测量量。

二、测量误差

由于在测量过程中各种因素的影响,使得测量结果总是具有误差。可以说,误差存在于一切实验过程中。

测量误差是指测量值与真值之差。真值是一个物理量在某种条件下的客观真实值,一般说来,真值是不知道的,因此在实际测量中,我们常用约定真值来代替真值,比如被测量的算术平均值、理论值、公认值等都是约定真值。测量值与约定真值之差叫做偏差。

误差和偏差是有区别的,但当测量次数很大时,偏差接近于误差。为方便起见,在以后

的讨论中我们不必去区分偏差和误差，而统称为误差。

三、误差的分类

误差的产生有多方面的因素。根据误差的性质及产生的原因，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而变化。

系统误差的产生大致有以下几个方面的原因：

仪器方面：如天平两臂不等长、仪器未调整或未调好就使用、螺旋有空行程等。

理论方面：由于依据的理论本身不严密或测量方法、测量条件和理论要求有出入而引起的，如在实验验证玻意耳-马略特定律 $PV = \text{恒量}$ 时，没有考虑到气体分子的固有体积和分子间的相互作用力；用伏安法测电阻时，电表内阻的影响等。

个人方面：是由于实验者本人生理或心理特点造成，如感觉器官不完善；用停表计时时，有人习惯于早按，有人往往滞后，诸如此类带来的误差。

由于系统误差使测量结果总是向一个方向偏离，即要么偏大要么偏小，采用多次测量求平均值并不能消除系统误差。

消除系统误差的常用方法是：

(1) 从误差来源上消除系统误差

这是解决系统误差问题的根本方法，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，对测量公式作出修正等。

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，逐步地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，用某一已知标准量替换被测量，以消除系统误差。例如，为消除天平两臂不准确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它条件都没有变化，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）相对交换，使产生系统误差的原因对测量结果起相反的影响，从而抵消系统误差。例如，用滑线电桥测电阻时，把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系统误差。

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，在拉伸法测金属丝杨氏模量实验中，加砝码与减砝码各记一次数，取平均值可消除摩擦等原因产生的系统误差。

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“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地总结经验,努力提高自己的专业水平,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

对于某一物理量,在相同的条件下进行多次重复测量时,即使系统误差已全部消除,仍然存在误差,而且误差时大时小,时正时负,即不可预知也无法控制,这种误差称为偶然误差。

产生偶然误差的可能原因主要有:

(1)判断的起伏。许多仪器均需对其最小分度以下作估计,而实验者的估计由于种种原因可以时时改变;

(2)涨落情况。如温度、湿度、压强、电源电动势的变化等;

(3)实验和测量过程中各种外界因素的干扰。如振动、电磁场、热、声、光等;

(4)被测量本身的不确定,如钢丝直径不均匀等。

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,就可以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律,由图 1-1-1 所示的曲线表示。 Δ 表示偶然误差, $f(\Delta)$ 表示与偶然误差出现的概率有关的函数。

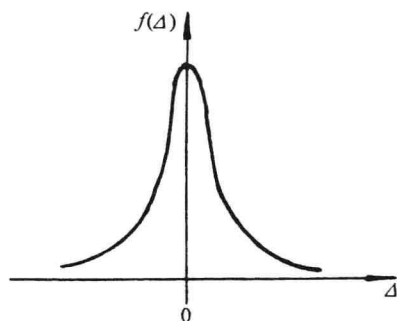


图 1-1-1

由高斯分布曲线可知,偶然误差服从下面的统计规律:

(1)绝对值相等的正负误差出现的概率相等(对称性);

(2)小误差出现的概率大,大误差出现的概率小(单峰性);

(3)在一定测量条件下,偶然误差的绝对值不会超过一定的界限(有限性);

(4)随着测量次数的增加,偶然误差的算术平均值趋近于零(抵偿性);

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)可以对偶然误差作合理的估计。

四、测量结果的评定

在实验中,通常用正确度、精密度和准确度定性表示测量结果的好坏。

1. 正确度 测量值或实验所得结果与真值的符合程度,是反映系统误差大小的。正确度高,系统误差小;正确度低,系统误差大。在用正确度描述测量结果时,偶然误差的大

小不明确。

2. 精密度 重复测量结果相互接近的程度,是反映偶然误差大小的。精密度高,重复测量结果相互接近,测量值集中,偶然误差小;精密度低,测量值分散,偶然误差大。在用精密度描述测量结果时,系统误差的大小不明确。

3. 准确度 综合反映系统误差和偶然误差的大小,准确度高,系统误差和偶然误差都小。

下面用打靶时子弹打在靶上的分布,来说明正确度、精密度和准确度这三个概念。

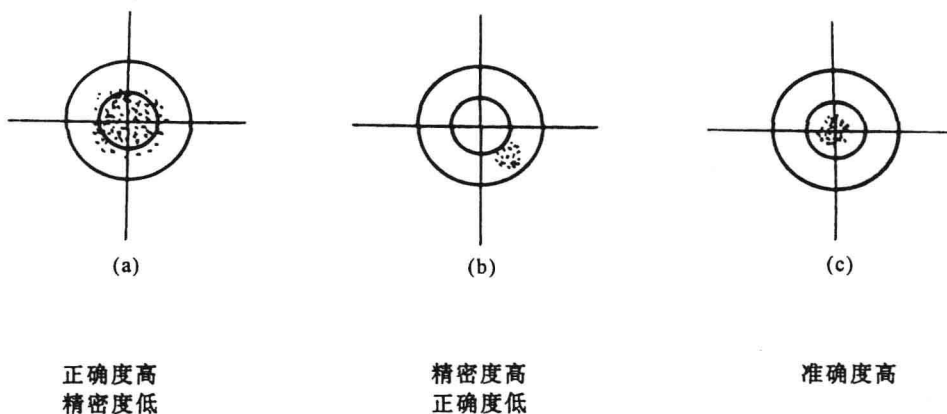


图 1-1-2

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作一个合理的估计。首先我们假定:系统误差已尽可能地消除或减小,或已作了修正;由于实验者粗心大意或操作不正确所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,使多次重复测量时每一次的测量值都有差异,那么什么样的值才是测量的最佳值呢?理论上可以证明,在进行有限次数测量时,算术平均值是最接近于真值的值。当测量次数无限增加时,算术平均值无限趋近于真值。所以我们用算术平均值作为测量的最佳值。

设某物理量为 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,

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

是第 i 次测量的标准差,称为贝塞尔公式。

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

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

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 $\Delta \bar{x}$ 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。用标准差 $s_{\bar{x}}$ 时,相对误差为

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

用算术平均误差时,相对误差为

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

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的精密度高低,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,所以国际上都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 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:

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

$$+1.0055+1.0057+1.0058+1.0056+1.0057) \\ =1.0056(\text{m})$$

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

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

$$\sum_{i=1}^{10} (L_i - \bar{L})^2 = (0+4+4+9+9+1+1+4+0+1) \times 10^{-8} (\text{m}^2) \\ = 33 \times 10^{-8} (\text{m}^2)$$

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

算术平均值和误差取几位参见 § 2 中的二、三。

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 只测了一次,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 $\Delta_{\text{仪}}$ 可按下面几种方法估计:

(1) 仪器标注了示值误差或基本误差,则仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 就取示值误差或基本误差。例如,量程在 150mm 以下的游标卡尺,国家标准规定,示值误差=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 $\Delta_{\text{仪}} = \pm 3 \times 1.5\% = 4.5\% = \pm 0.05\text{A}$ 。

(3) 能连续读数的仪器(如米尺读数时能在分度值以下进行估读的仪器),仪器误差取分度值的一半,即

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

例如米尺,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 $x, y, z \cdots$ 是彼此独立的物理量,间接测量量 N 是 $x, y, z \cdots$ 的函数,则有

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

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

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

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的算术平均值。

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

$$\begin{aligned} \text{解: } \bar{g} &= 4\pi^2 \frac{\bar{L}}{\bar{T}^2} = 4 \times 3.1416 \times \frac{1.000}{(2.000)^2} \\ &= 9.872\text{m/s}^2 \end{aligned}$$

2. 间接测量的误差传递公式

由于 N 是根据 $x, y, z \cdots$ 直接测量的量按一定的函数关系算出来的,而 $x, y, z \cdots$ 有误差,所以 N 必然也有误差,这就叫误差的传递。 N 的误差与 $x, y, z \cdots$ 的误差和函数关系有关,反映 N 的误差与 $x, y, z \cdots$ 误差的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(1-1-11)式求全微分有

$$dN = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz + \cdots$$

此式表示,当 $x, y, z \cdots$ 有微小改变 $dx, dy, dz \cdots$ 时, N 改变 dN , 由于误差远小于测量值,用 $\Delta N, \Delta x, \Delta y, \Delta z \cdots$ 分别代替 $dN, dx, dy, dz \cdots$, 同时考虑到误差可能出现的最大值,右方各项均取绝对值,就是误差传递公式了,即

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

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:

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