



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

结构化大学物理实验

(第二版)

姚列明 主编 霍中生 吴 静 于景侠 李朝霞 副主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等学校物理实验中心系列教材

结构化大学物理实验

JIEGOUHUA DAXUE WULI SHIYAN

(第二版)

姚列明 主编 霍中生 吴 静 于景侠 李朝霞 副主编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS · BEIJING

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书打破传统的将物理实验按力、热、电、光、近代这种单一学科分支结构的划分,而按专题模式分为11个模块,它们分别是误差与数据处理时间的测量、长度与角度的测量、相互作用的测量、场的测量、物理常量的测量、随机运动的研究、混沌现象的研究、数值模拟实验、信息物理实验、设计与研究式实验。全书选编了具有代表性的基础物理实验、近代物理实验和现代物理实验共70多个,既注重基础知识、基本方法和基本技能方面的训练,又有近代物理中的一些常用的方法、技术、仪器和知识,同时引入一些当代的先进技术,力求紧跟时代的发展。

本书可作为高等学校工科类专业或应用物理专业的物理实验教学用书,也可作为实验技术人员或有关课程教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

结构化大学物理实验 / 姚列明主编. --2版. --北京:高等教育出版社, 2012.9

ISBN 978-7-04-035164-4

I. ①结… II. ①姚… 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(2012)第158694号

策划编辑 忻蓓

责任编辑 忻蓓

封面设计 王睢

版式设计 于婕

插图绘制 尹莉

责任校对 刘莉

责任印制 田甜

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京民族印务有限责任公司
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 37.75
字 数 710千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>

版 次 2009年8月第1版
2012年9月第2版
印 次 2012年9月第1次印刷
定 价 51.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 35164-00

序

物理学是实验科学,在物理学发展过程中,物理实验始终占据重要地位。在强调素质教育、呼唤加强创新人才培养的形势下,物理实验课更是受到各级教学主管部门的格外重视。近几年来,教育部精品课程建设、精品教材建设、高等学校实验教学示范中心建设等系列项目的开展,为高校推进实验室建设、提高基础课实验教学质量、促进高素质创新人才的培养创造了条件。

我校非常重视物理实验课程的建设,在课程体系、教学内容、教学方法与教学手段上进行了全方位改革,整个课程实现了分阶段、分层次的教学,结构化的实验改革打破了传统的力、热、电、光、近代这种单一学科分支结构的划分,转变为内部专门化、综合化,方法多样化、高技术化,有时代特征的专题结构实验教学模式。这种模式充分发挥学生的个性和自主性,实行因材施教,分流培养,调动了学生的学习积极性、主动性。教材要跟上改革的步伐,既把重点放在为学生终身的生存和发展打基础,又能反映当代国内外科技进步的最新成果。同时教材应具有更大的灵活性和适应性。

本教材的特点有四个方面:

1. 基本能力训练

使学生在物理实验的基础知识、基本方法和基本技能方面受到系统的训练,理论联系实际,培养学生初步的实验技能,良好的实验习惯以及严谨的科学作风,使学生逐步具有良好的实验素质,同时又为他们进行其他课程的学习以及走向社会打好基础。

2. 知识面广而新

具有较强的综合性和技术性,在锻炼学生的能力方面更具系统性。让学生掌握一些基本的实验方法的基础上学习近代物理中的一些常用的方法、技术、仪器和知识,在数据的显示、采集和处理方面与现代技术相联系,使学生获得用实验方法和技术研究物理现象和规律的独立工作能力,让他们的实际动手能力上一个新台阶。本课程根据大纲要求在开设一些近代物理的典型实验外,还注意联系现代技术的发展,开设一些内容新颖、涉及知识面广的实验,把传感技术、应用电子技术和计算机应用技术恰当地引入到有关的实验中去,充分体现现代科

学技术成就带有多种学科交叉和相互渗透的特点,让学生掌握时代技术的脉搏,了解现代检测技术和新发现,扩大眼界,增加知识面。

3. 学生能力的全方位培养

增加了模拟计算的内容。随着计算机技术的发展和科学技术的进步,科学与工程计算的应用范围已扩大到许多学科领域。目前,实验测定、理论解析、模拟计算已成为人类进行科学活动的三大方法。增加这部分内容就是为了让学学生尽快掌握当代的先进技术,了解一些边缘学科,例如计算物理、计算化学、计算力学等,让他们能紧跟时代的发展,培养他们的探索精神,同时也是编者对物理实验内容的创新,增强了物理实验的时代气息。

4. 创新能力的培养

教材中的课题型实验建立了实验课的新模式,其目的是改变学生被动接受的学习模式,加强科学探究学习,培养学生的自主能力和科研能力,提高实验素质。实验过程包括查资料、设计实验、理论模拟计算、实验数据采集、归纳总结以及撰写论文等。课题型实验既不同于基础实验,也有别于科研,而是介于两者之间的一个人才培养空间,是拓展实验室和培养新型人才的一种新模式,学生在探究过程中才能体验物理实验的魅力,探究学习将给物理实验教学带来新的生机。

考虑到教学仪器更新较快,各校使用的仪器不同,也由于篇幅的限制,本教材偏重物理原理和实验思想的介绍,对具体仪器和操作步骤的介绍较少。我们将仪器使用和实验步骤编入了配套的实验指导书中,这样便于配合实验仪器的调整和更新,增加了教材的普适性。

本教材按专题进行排列,实验总数比较多,每章的实验难易程度不同,某些实验内容也比较多,教学时应根据实验课的层次和课时进行选择,灵活使用。

我校物理实验中心的霍中生、吴静、陈中均、于景侠、罗浩文和李朝霞老师参与了本教材的编写。由于水平有限,书中难免有不妥或疏漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

2011 年 12 月 28 日

目 录

第一章 误差与数据处理	(1)
引言	(1)
第一节 测量与误差	(1)
第二节 测量不确定度	(12)
第三节 有效数字	(23)
第四节 数据处理	(28)
附录	(44)
习题	(50)
第二章 时间的测量	(53)
引言	(53)
实验 2.1 气轨上动量守恒定律的研究	(53)
实验 2.2 单摆实验	(57)
实验 2.3 刚体转动惯量的测定	(59)
实验 2.4 示波器的调整与应用	(63)
实验 2.5 波尔共振实验	(73)
实验 2.6 盖革 - 米勒计数器的特性	(77)
实验 2.7 γ 闪烁计数器	(84)
第三章 长度与角度的测量	(90)
引言	(90)
实验 3.1 薄透镜焦距的测定	(91)
实验 3.2 牛顿环测曲面半径	(96)
实验 3.3 劈尖干涉	(99)
实验 3.4 分光计测角度	(100)
实验 3.5 迈克耳孙干涉仪的调整与使用	(104)
实验 3.6 偏振光实验	(111)
实验 3.7 椭圆偏振测薄膜厚度与折射率	(121)
实验 3.8 全息法测三维位移	(127)

实验 3.9 拉伸法测杨氏模量	(131)
实验 3.10 电容器法测杨氏模量	(135)
实验 3.11 旋转法测重力加速度	(136)
实验 3.12 超声声速的测定	(139)
实验 3.13 扫描探针显微镜	(143)
第四章 相互作用的测量	(152)
引言	(152)
实验 4.1 机械波聚焦与应用	(152)
实验 4.2 弗兰克 - 赫兹实验	(155)
实验 4.3 核磁共振	(159)
实验 4.4 塞曼效应	(168)
实验 4.5 声光效应	(175)
实验 4.6 X 射线综合实验	(181)
实验 4.7 电子束的静电聚焦与电磁偏转	(185)
实验 4.8 磁光效应	(191)
实验 4.9 半导体热电特性综合实验	(197)
实验 4.10 多晶材料定性物相分析	(200)
第五章 场的测量	(208)
引言	(208)
实验 5.1 电势差计测电动势	(208)
实验 5.2 磁致伸缩实验	(213)
实验 5.3 霍尔效应法测量磁场分布	(220)
实验 5.4 巨磁阻效应测量亥姆霍兹线圈磁场分布及地磁场	(225)
实验 5.5 热电模拟法测量散热系统的热参数	(229)
实验 5.6 用光栅测波长	(237)
实验 5.7 光谱微机分析	(240)
实验 5.8 光栅单色仪的使用	(245)
实验 5.9 微波迈克耳孙干涉和布拉格衍射	(252)
实验 5.10 反射速调管的工作特性与微波基本参量的测量	(263)
实验 5.11 微波介质特性的测量	(274)
实验 5.12 静电场模拟	(277)
实验 5.13 金属薄膜磁电阻特性综合实验	(283)
第六章 物理常量的测量	(287)
引言	(287)
实验 6.1 多普勒效应和重力加速度测量综合实验	(287)

实验 6.2	光电效应法测普朗克常量	(293)
实验 6.3	密立根油滴实验——电子电荷的测定	(299)
实验 6.4	差频相位法测量光速	(304)
第七章	随机运动的研究	(314)
引言		(314)
实验 7.1	低温固体热导率测量	(314)
实验 7.2	核衰变的统计规律	(319)
第八章	混沌现象的研究	(324)
引言		(324)
实验 8.1	非线性电路混沌现象	(324)
实验 8.2	倒摆的规则、随机与混沌运动	(328)
第九章	数值模拟实验	(334)
引言		(334)
实验 9.1	长直螺线管的磁场分布	(340)
实验 9.2	基于 ANSYS 的电子散热优化	(353)
实验 9.3	基于 FloRHERM 的电子散热优化	(368)
实验 9.4	计算机机箱散热性能优化问题的研究	(406)
实验 9.5	超声换能器的共振频率	(408)
实验 9.6	静电场的数字模拟范例	(411)
第十章	信息物理实验	(413)
引言		(413)
实验 10.1	光信息的空间传输	(413)
实验 10.2	微波信号的发射与接收传输	(416)
实验 10.3	音频信号的光纤传输	(421)
实验 10.4	全息照相	(428)
实验 10.5	全息光栅的设计与制作	(435)
实验 10.6	像全息图与一步彩虹全息图	(439)
实验 10.7	应用散斑摄影术研究位相物体	(442)
第十一章	设计与研究式实验	(448)
引言		(448)
实验 11.1	伏安法测线性电阻和非线性电阻	(448)
实验 11.2	非平衡电桥与压力传感器	(452)
实验 11.3	半导体光电二极管伏安特性的测定	(459)
实验 11.4	全息光学元件的设计与制作	(464)
实验 11.5	荧光分光光度计的调整和使用	(471)

实验 11.6	真空的获得与测量	(482)
实验 11.7	减压降温技术与电阻的温度关系	(486)
实验 11.8	半导体制冷系统最佳制冷系数的测量	(490)
实验 11.9	小型制冷机的制冷系数及热力完善度	(496)
实验 11.10	金属薄膜磁电阻特性综合实验	(498)
实验 11.11	锁相放大器	(503)
实验 11.12	信号的频谱分析	(510)
实验 11.13	A/D 与 D/A 变换器的研究	(518)
实验 11.14	热焓法测定复合大块金属玻璃结晶度	(529)
实验 11.15	Rietveld 多晶粉末晶体结构精修	(538)
实验 11.16	PASCO 物理系列实验	(549)
附 表		(586)

第一章 误差与数据处理

引 言

物理实验有两方面的任务:一是定性地观察物理现象和变化过程;二是定量地测量物理量并确定物理量之间的关系。要测量就会有误差,而误差的存在与大小将直接影响测量效果;要确定物理量之间的关系只有通过对其数据进行处理才能完成。因此,研究误差与数据处理是物理实验必不可少的。

当今误差与数据处理已成为一门学科,其中包含的内容很多,又比较繁杂,其理论基础是概率论与数理统计。本书不全面介绍误差与数据处理的内容,也不过多地进行繁杂的数学推导与论证,只介绍一些常用的误差与数据处理的初步知识和作一些简单而必要的推导。

第一节 测量与误差

一、测量与误差的基本概念

(一) 测量

1. 测量的含义

测量是人类认识和改造客观世界的一种必不可少的重要手段。在物理实验中,特别是在定量研究中的测量是必需的。

什么是测量?测量就是把待测物理量与作为计量单位的同类已知量相比较,找出被测量是单位多少倍的过程。这个倍数叫做测量的读数,读数加上单位记录下来就是数据。任何物理量都是有单位的。因此,在物理实验中,测量物理量记录数据时,一定不要忘记记录单位。

在完成一个测量时,必须明确测量对象、测量单位、测量方法和测量准确度,通常把这四点称为测量的四要素。

2. 测量的分类

在科学实验中会遇到各种类型的测量,我们可以从不同的角度对测量进行分类。按获得数据的方法可分为直接测量和间接测量;按测量条件的不同可分为等精度测量和非等精度测量。

a. 直接测量和间接测量

直接测量:直接由仪器标尺(刻度)等读数而获得被测量的值的测量,称为直接测量。例如,用游标卡尺测量长度,用秒表测量时间,用天平测量质量,用电流表测量电流,用温度计测量温度等。

间接测量:有的物理量的测量很难通过仪器直接读数得到结果,但通过一些方法找到这个量与某些能进行直接测量的量之间的函数关系(公式),就能算出被测量的大小,这种测量称为间接测量。例如,测量一个圆柱体的体积,就可利用公式(函数关系) $V = \pi R^2 h$,在用米尺或游标卡尺等测长仪器直接测出半径 R 和高 h 后,代入公式中算出 V 。通过这种方式进行体积 V 的测量就是间接测量。

直接测量是基本的,间接测量是大量的;任何间接测量都是通过直接测量来实现的。一个间接测量量在一定的条件下也可以进行直接测量。比如速度的测量,一般是直接测出时间 t 和在时间 t 内通过的路程 s 后,利用公式 $v = s/t$ 得到;而速度表则可通过直接读数测出车的速度。直接测量和间接测量也是相对的,例如用伏安法测电阻是间接测量;而用箱式电桥测电阻则是直接测量。

b. 等精度测量与非等精度测量

在测量过程中,影响测量结果的各种条件不发生改变(多次)测量叫做等精度测量;反之,称为非等精度测量。例如,在相同的环境中,由同一个人,在同一台仪器上,采用同样的方法对同一物理量进行多次测量就是等精度测量。显然,它们的可靠程度是相同的,这就是说,对同一物理量进行可靠程度相同的多次测量就是等精度测量。如果在不同的环境中,或由不同人员,或在不同的仪器上,或采用不同的方法,总之在改变测量条件的情况下对同一物理量进行多次测量,其可靠程度是不相同的,即这种测量是非等精度测量。

(二) 误差的基本概念

1. 真值

任何一个物理量在某一时刻和某一位置或某一状态下,都存在着一个客观值,这个客观值称为真值。

2. 绝对误差与相对误差

a. 绝对误差

测量当然希望得到真值,但不管测量仪器多么精密,采用的方法多么完善,环境多么稳定;实验人员的技术多么精湛,测量值与真值之间总存在着差异,这个差异就称为误差,其定义式为

$$\Delta'N(\text{误差}) = N_i(\text{测量值}) - N(\text{真值}) \quad (1.1-1)$$

由于是测量值对真值的绝对偏离,通常把它称为绝对误差。显然绝对误差除大小外,还有正负(方向),而且,由于是一个物理量,还有单位。

在实验中经常会碰到一个与误差相关的概念——修正值,其定义式如下:

$$\Delta(\text{修正值}) = N(\text{真值}) - N_i(\text{测量值}) \quad (1.1-2)$$

由此可得

$$N(\text{真值}) = N_i(\text{测量值}) + \Delta(\text{修正值})$$

注意: 从误差与修正值的定义中可知,误差与修正值只差一个符号。

b. 相对误差

绝对误差的大小能够反映对同一被测量的测量效果的好与差。比如对一长度为 1 m 左右的物体进行测量,绝对误差为 5 cm 的就比为 10 cm 的测量效果好;但对不同的被测量就很难确定了,比如测量长为 1 m 的物体的绝对误差是 1 cm,测量长为 10 cm 的物体的绝对误差为 5 mm,用绝对误差就不能确定了。为此,引入相对误差的概念。相对误差 E 定义为

$$E = \frac{\Delta'N}{N} \times 100\% \quad (1.1-3)$$

式中, $\Delta'N$ 和 N 分别为绝对误差和真值。我们一般用算术平均值,甚至测量值来代替公式中的真值。由相对误差的大小就可比较两个测量效果的好与差了。比如上述例子中,第一个测量效果就比第二个测量效果好,尽管它的绝对误差比第二个测量的大。

3. 误差的来源

在任何测量中都存在着误差,因此,测量时必须对误差进行分析。为了很好地分析误差,了解误差来源是很有必要的。误差的主要来源有下述几个方面:

a. 仪器误差

由于仪器本身的不完善或调整、使用不当,提供的标准量欠准或随时间的不稳定性等产生的误差。

如等臂天平不等臂;分光计读数标线与角度盘不同心;螺旋测微计零点不准;需调水平、垂直等未达到;不满足使用条件;电路中电池电压随放电时间延迟而降低,引起电路中电流的变化;激光波长的长期稳定性变化等。

b. 方法误差

由于实验方法和理论的不完善或测量所依据的公式的近似性而导致的误差。

如伏安法测电阻,不管是采用内接法还是外接法,由于电表内阻的影响带来的误差;在推导单摆的周期公式 $T = 2\pi(l/g)^{1/2}$ 时,要求摆角趋于零,摆球的体积趋于零,实验时因做不到而带来的误差等。

c. 环境误差

由于各种环境因素,如温度、湿度、气压、振动、光照、电磁场等与要求的标准状态不一致及其在空间上的梯度随时间变化,引起测量仪器的量值变化、机构失灵、相互位置改变等产生的误差。

d. 人员误差

由于测量者生理上的最小分辨力、感觉器官的生理变化、反应速度和固有习惯引起的误差。如计时按表测量者滞后或超前的趋向;对准标志读数时始终偏左或偏右;用人眼判定光的强度来获取数据时,由于眼睛对光强分辨力不够带来的误差等。

测量时人员误差主要表现为“估读误差”。估读误差就是测量者对被测对象的起点和终点与仪器进行比对测量的判断误差。比如米尺测量长度时零刻度对齐和长度测量的估读;指针式电表判断零差和指针相对刻度的估读;牛顿环和迈克耳孙实验数干涉条纹时由于光强连续过渡无法准确判断最强光或最弱光的位置;用秒表测量时间时测量者按秒表时造成时间超前或滞后的误差等。估读误差是这类测量中必须考虑的人员误差。

任何测量都要用到仪器(直尺也是一种简单的长度测量仪器)。没有一种仪器是绝对精确的,所以,所有测量都存在仪器误差。

一般情况下,仪器生产厂把测量方法、环境和人员的误差因素综合考虑,且把这些误差合并入仪器误差,测量者只要按说明书规定的方法、环境条件和操作规程进行,主要考虑仪器误差和人员误差就可以了。

值得一提的是随着数字化、智能化仪器的不断普及,测量人员对测量的干预越来越少,有些测量中人员误差可以不再考虑。例如用“数显光电触发式计时器”测量单摆周期,由于不用测量人员判断摆动的起点和终点、不存在计时按表测量者的滞后或超前、不存在测量者读秒表时的读数误差,所以该测量可以不考虑人员误差。但这并不表示测量者可以掉以轻心,相反,应该密切关注测量仪器、对象和过程,因为自动化程度提高后,仪器变得复杂,由于操作仪器不当,造成仪器误差增大,甚至出现“坏值”的情况也会发生。

4. 误差的分类

误差是各种各样的,它们各具特点,为了研究方便必须对误差进行分类。分类的方法不止一种,本书只采用按误差性质分类的方法,它可以分为“系统误差”和“偶然误差”两大类。

a. 系统误差

在同一条件下多次测量同一量时误差的绝对值和符号保持不变,或在改变条件时,按某一确定的规律变化的误差,称为系统误差。显然,它的特点是恒定性。

例如,用一只未调零(如指针指在2 mV)的电压表去测电压,不管测量多少次,每次测量由于未调零产生的误差(零差)都是2 mV,这种误差就是系统误差;天平不等臂造成的误差、分光计中由于度盘偏心引起角度测量的误差(此误差按正弦规律变化)等也都是系统误差。

系统误差按测量者掌握的程度可分为“已定系统误差”和“未定系统误差”。前者是大小和符号都知道的系统误差;后者则是或大小、或符号、或大小与符号都不知道的系统误差。

不论哪一种系统误差,根据其特点可知,不可能通过多次测量来减小或消除。

b. 偶然误差

在一定条件下对同一物理量进行多次测量,并极力消除或修正一切明显的系统误差之后,每次测量结果还会出现无规律的随机变化,其误差时大时小、时正时负,不可预测,但总体来说又服从一定统计规律的误差,称为偶然误差。它的特点是随机性,故又把偶然误差称为随机误差。

例如,采用物距像距法测量凸透镜的焦距时需要测量像的位置,由于眼睛对像的清晰度的分辨本领不足而使每次读数不同产生的误差就是偶然误差。

注意: 偶然误差都是随机误差,但随机误差不全是偶然误差,它还包含部分系统误差。

根据偶然误差的特点可知,多次测量可以减小偶然误差。

c. 系统误差与偶然误差的关系

上面在讨论系统误差和偶然误差时是分别进行的,即是在没有偶然误差的情况下研究系统误差,和在系统误差可以不考虑的情况下研究偶然误差。实际上对任何一次实验,既存在系统误差,又存在偶然误差,只有一种误差的实验是不存在的。当有些实验以系统误差为主,有些实验以偶然误差为主时,就可以忽略另一种误差的存在。

系统误差具有恒定性的特点,而偶然误差的特点是随机性。就其特点而论,似乎这两类误差是可决然分开的,实际上并非完全如此。例如,试分析用刻度不均匀的米尺给测量带来的误差。对米尺上某一确定位置的刻度值与真值之间的误差,不管测量多少次都是不会改变的,显然这个误差是系统误差;但对米尺的各处来讲,每个确定位置的刻度值与真值之间误差的大小和方向都不确定,具有随机性,显然这是偶然误差。再如某实验人员在读数时总习惯偏向一方,产生的误差是系统误差;另一实验人员在读数时没有总偏向一边的习惯,有时偏左,有时偏右,产生的误差无疑是偶然误差。系统误差与偶然误差的这种关系正好反映出这种分类方式的缺陷,实验不确定度(见本章第二节)就可以克服这个缺陷。

由于系统误差和偶然误差性质不同,所以处理的方法也不同。比如多次测量可以减小偶然误差,而对系统误差就无能为力,系统误差只有用其他方法进行减少或消除。

d. 其他情况

在实验过程中,除系统误差和偶然误差外,还可能出现仪器损坏、操作不当造成的错误或读数、记录的错误等。这些错误不宜称为误差(可称为粗大误差),因为误差不全等于错误。当然实验中应当避免错误的发生,只要注意,错误是一定能避免的。

5. 误差的几个相关概念

a. 精密度

精密度是指重复测量所得结果相互接近(或离散)的程度,它的高低反映偶然误差的大小。即精密度越高,数据越接近,偶然误差就越小;反之偶然误差就越大。

b. 正确度

正确度是指测量值或实验结果与真值的符合程度,它的高低反映系统误差的大小。即正确度越高,测量值越接近真值,系统误差就越小;反之系统误差就越大。

c. 准确度

准确度(又称精确度)是精密度与正确度的综合反映。当偶然误差小到可以不计,准确度等于正确度;当系统误差小到可忽略或得到修正消除时,准确度等于精密度。两者都高,准确度就高;两者之一低或两者都低,则准确度低。

它们之间的关系可以通过打靶形象地表示出来,如图 1.1-1 所示。

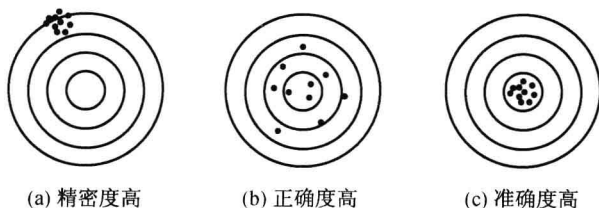


图 1.1-1 误差的几个相关概念示意图

另外,“精度”这个词经常出现在各类实验书中,其实它是一个含义不确切的词,通常指准确度。

二、直接测量偶然误差的估计

测量时误差不可避免,没有误差的测量是不存在的。误差的大小又直接关系到测量效果的好与差,因而进行误差计算的必要性就显而易见了。如果知道真值时,就可以根据式(1.1-1)来计算误差。例如三角形三内角和为 180° (理论值,即真值),测出三个内角的和是 $180^\circ 31'$ (测量值),那么误差就是 $31'$ 。不过知道真值来进行误差计算的情况不多,对测量而言也没有多大实际意义。有实际意义的是通过测量得到真值,但由于误差的存在,通过测量是得不到真值的,因此就很难用式(1.1-1)来计算误差。实际上误差是通过其他方法进行“估计”的。由于偶然误差服从统计分布规律,一般可通过数理统计的方法进行估计。估计误差方法有多种,下面只介绍其中一种——标准偏差的估计方法。

(一) 偶然误差服从的统计分布规律

大多数偶然误差的变化是均匀的、微小的和随机的。可以证明,这种偶然误差服从的统计规律是正态分布,又称高斯分布,如图 1.1-2 所示。图中横坐标 ΔN 表示偶然误差,纵坐标 $f(\Delta N)$ 表示在误差值为 ΔN 附近单位误差间隔内,误差值 ΔN 出现的概率。

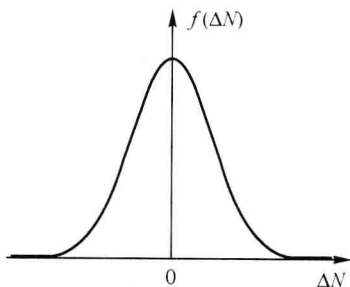


图 1.1-2 偶然误差的正态分布

由图可知当偶然误差服从正态分布时,具有下列三种特性:

- (1) 单峰性:绝对值小的误差出现的概率大。
- (2) 有界性:在测量条件一定的情况下,大误差再现的概率小,且不超过一定的界限。
- (3) 对称性:绝对值相等的正负误差出现的概率相同。

本章只应用正态分布的结果,其函数形式见本章附录,进一步的推导请参考数理统计的有关书籍。

除正态分布外,偶然误差还有多种分布,如均匀分布等,本课程不要求掌握,涉及的所有偶然误差全部近似为正态分布进行估计。

(二) 以算术平均值表示真值

在相同条件下对某物理量进行 n 次等精度重复测量,每次的测量值分别为 $N_1, N_2, \dots, N_n$, 真值为 N , 则任意一次测量的误差 $\Delta'N_i = N_i - N$ 。根据(服从正态分布的)偶然误差的对称性,即当 $n \rightarrow \infty$ 时,绝对值相同的正负误差出现的概率相同,有

$$\sum_{i=1}^n \Delta'N_i = 0 \quad (1.1-4)$$

即

$$(N_1 - N) + (N_2 - N) + \cdots + (N_n - N) = \sum_{i=1}^n N_i - nN = 0 \quad (1.1-5)$$

$$N = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i = \bar{N}$$

由式(1.1-5)可知,在测量次数为无限次时,其算术平均值 $\bar{N}$ 就是真值 N 。

实际上,测量次数不可能是无限的,相反,都是有限的,这时的算术平均值不是真值,但它是最近真值的测量值,称为测量的“近真值”。所以测量误差可用测量值与平均值之差来表示:

$$\Delta N_i = N_i - \bar{N} \quad (1.1-6)$$

式(1.1-6)中, N_i 是多次测量中的任意一次测量值, ΔN_i 是任意一次测量值的绝对误差。

这种用算术平均值代替真值算出的误差,称为“偏差”。显然误差与偏差是有区别的,由于偏差与误差相差很小,偏差就当作误差了,但我们应当知道它们的区别。

(三) 用标准偏差估计误差

我们已经知道,大多数误差都服从正态分布。从正态分布出发,利用数理统计理论,可以得到估计偶然误差的公式。下面就给出用标准偏差估计偶然误差的公式。

当测量次数 n 为有限时,多次测量中任意一次测量值的标准偏差 S 为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n-1}} \quad (1.1-7)$$

算术平均值对真值的偏差 $S_{\bar{N}}$ 是任一次测量值标准偏差 S 的 $\sqrt{n}$ 分之一,即

$$S_{\bar{N}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n(n-1)}} \quad (1.1-8)$$

这里说明一点,任意一次测量值的标准偏差 S 与平均值的标准偏差 $S_{\bar{N}}$ 仅差一个 $\sqrt{n}$,但其意义是不同的。 S 表示多次测量中每次测量值的“分散”程度, S 小表示每次测量值很接近,反之则比较分散,它随测量次数 n 的增加变化很慢; $S_{\bar{N}}$ 表示平均值偏离真值的多少,小则更接近真值,大则远离真值,它的大小随测量次数 n 的增加收敛得很快,说明增加测量次数可以减小偶然误差。

正态分布仅适合于测量次数较多的情况,当测量次数较少时,偶然误差的分