

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主 编
陈文钦
彭玉霞

DAXUE WULI SHIYAN

湖南师范大学出版社

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主 编 陈文钦 彭玉霞
副主编 庾名槐 周诗文 袁 珍
编 委 郭 惠 史常圣 赵顺才
王 赵 李 劲
主 审 李 光 彭尚忠

湖南师范大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验 / 陈文钦, 彭玉霞主编. —长沙: 湖南师范大学出版社, 2009. 2

ISBN 978 - 7 - 5648 - 0020 - 8

I. 大… II. ①陈…②彭… III. 物理学—实验—高等学校—教材
IV. 04 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 017568 号

大学物理实验

◇主 编: 陈文钦 彭玉霞

◇策划组稿: 莫 华

◇责任编辑: 胡晓军

◇责任校对: 蒋旭东

◇出版发行: 湖南师范大学出版社

地址/长沙市岳麓山 邮编/410081

电话/0731. 8853867 8872751 传真/0731. 8872636

网址/http: //press. hunnu. edu. cn

◇经销: 湖南省新华书店

◇印刷: 长沙化勘印刷有限公司

◇开本: 787 × 1092 1/16

◇印张: 15. 5

◇字数: 398 千字

◇版次: 2009 年 2 月第 1 版 2009 年 2 月第 1 次印刷

◇书号: ISBN 978 - 7 - 5648 - 0020 - 8

◇印数: 1—2000 册

◇定价: 28. 00 元

大学物理实验编委设置

主 编	陈文钦	彭玉霞	
副主编	庾名槐	周诗文	袁 珍
编 委	郭 惠	史常圣	赵顺才
	王 赵	李 劲	
主 审	李 光	彭尚忠	

前言

本书是依据高等学校物理学与天文学教学指导委员会非物理类专业物理基础课程教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学要求》(2008 年版),结合我校实验室的实际教学和仪器设备情况在原来《大学物理实验》讲义的基础上编写而成.本书针对物理实验教学的要求和特点,把全书内容分为四部分,包括物理实验的基础知识、基础物理实验、仿真实验和附录.本书可以作为农、理、工科等非物理专业的大学物理实验课程的教材,也可以作为物理实验爱好者的参考资料.

本书的特点:

1. 所选 33 个实验,既有基础性实验,综合性、设计性实验,也有近代物理实验,还有虚拟仿真实验;
2. 本书对实验仪器装置及使用方法都作了简明扼要的介绍,学生不用对着仪器都可进行预习,解决了没有实物看不懂的问题,同时部分常用仪器的介绍及使用集中编写在预备实验中,方便学生集中学习;
3. 本书中列有实验数据记录参考表格,既可给学生一种启发,也可让学生做实验时直接将实验数据填入表格内,有效防止实验数据丢失的现象;
4. 对某些实验进行适当的历史背景知识介绍,并对应用前景进行说明,以提高学生对物理实验的兴趣.

本书是一项集体的劳动成果,是对过去实验教学工作的总结和改进.本书由海南大学陈文钦、彭玉霞主编,参加本书编写工作的人员有:陈文钦(绪论,附录 I,附录 III,实验五、七、十、十一、十四、二十、二十一、二十六和三十二);彭玉霞(附录 II,第二、三章和实验十三、十七、二十三、三十一)、庾名槐(实验四、六、二十四和二十五)、周

诗文(第一章、实验十九)、袁珍(实验二、三、八、十二、十五、十六、二十七和三十)、郭惠(实验一、九、十八、二十二、二十八、二十九和三十三). 教研室史常圣、王赵、李劲和赵顺才老师也参与了部分实验的编写工作.

本书由陈文钦、彭玉霞负责全书的统稿和修改工作.

本书由从事大学物理教学二十多年的海南大学实践教学管理处处长李光教授担任主审,物理教学部主任彭尚忠副教授审阅了全书,并提出了宝贵的修改意见.

在本书编写出版过程中,得到海南大学教务处和公共实验中心的大力支持,同时参考了兄弟院校的有关教材,也参考和部分引用了复旦天欣、南京桑力电子和中国科大人工智能与计算机应用研究室等有关机构的相关资料,在此表示衷心的感谢.

由于我们水平有限,书中难免有不妥之处甚至错误,恳请使用本书的师生批评指正.

编 者

2008 年 11 月

目 录

绪论	(1)
----	-------

第一部分 物理实验的基础知识

第一章 物理量的测量、误差及数据处理的基础知识	(4)
第一节 测量、误差、不确定度的基本概念	(4)
第二节 测量结果的表达	(7)
第三节 有效数字	(17)
第四节 实验数据的处理方法	(23)
第二章 物理实验的基本测量方法和基本实验操作方法	(33)
第一节 物理实验的基本测量方法	(33)
第二节 物理实验的基本操作技术	(36)
第三章 基本仪器介绍	(37)

第二部分 基础实验

实验一 基本测量	(50)
实验二 落球法测液体的粘滞系数	(53)
实验三 用毛细管升高法测量液体的表面张力系数	(57)
实验四 气垫导轨实验	(59)
实验五 转动惯量的测量	(71)
实验六 杨氏模量测定	(78)
实验七 线膨胀系数测定	(88)
实验八 空气比热容比测定	(93)
实验九 静电场的模拟测绘	(97)
实验十 单臂、双臂电桥测电阻	(101)
实验十一 圆线圈和亥姆霍兹线圈磁场测定	(109)
实验十二 霍耳效应法测量磁场	(113)
实验十三 示波器及其应用	(119)
实验十四 声速测量	(131)
实验十五 读数显微镜测玻璃的折射率	(139)
实验十六 等厚干涉及应用	(141)
实验十七 分光计的结构与调节	(146)
实验十八 用最小偏向角法测量玻璃三棱镜的折射率	(151)
实验十九 用透射光栅测光波波长及角色散率	(155)

实验二十	薄透镜焦距的测量	(159)
实验二十一	光偏振现象的研究	(164)
实验二十二	单丝和单缝衍射实验现象的研究	(169)
实验二十三	利用布儒斯特定律测定固体介质折射率	(172)
实验二十四	光电效应测定普朗克常量	(175)
实验二十五	光纤音频信号传输	(183)
实验二十六	磁滞回线实验	(189)
实验二十七	照相技术	(195)
实验二十八	PN 结正向压降与温度关系的研究	(202)

第三部分 仿真实验

实验二十九	核磁共振	(209)
实验三十	油滴法测电子电荷	(212)
实验三十一	不良导体导热系数的测定	(216)
实验三十二	氢氘光谱拍摄	(220)
实验三十三	弗兰克-赫兹实验	(224)
附录 I	实验预习报告和实验报告范本	(229)
附录 II	物理实验常用数据	(233)
附录 III	物理实验室仪器名称与型号	(237)



绪 论

一、物理实验课程的地位、作用与任务

物理学是研究物质结构、性质和变化基本规律的学科,它的研究涉及物质运动的普遍形式,包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核内的运动等。物理学是自然科学的基础,也是当代工程技术的重大支柱。物理学有助于技术的基本建设,有助于扩展和提高我们对其他学科的理解,物理学也提供了应用于其他学科新设备和新技术所需的基本知识。鉴于物理学的重要性,联合国大会于2004年6月通过了2005年为“国际物理年”的决议,在该决议中指出:“物理学为了解自然界提供了重要基础;物理学及其应用是当今众多技术进步的基石;物理教育提供了建设人类发展所必需的科学基础设施的工具……”

科学的理论来源于科学的实验并受到实验的检验,当然实验也离不开理论的指导。作为自然科学基础的物理学在本质上是一门实验学科。从物理学的发展历史看,物理规律的发现和物理理论的建立都必须以物理实验为基础,物理学中的每一项突破都与实验密切相关。例如,在19世纪60年代,麦克斯韦总结前人的实验结果和理论,统一成完整的电磁场理论,并预言了电磁波的存在,十多年后,赫兹完成了电磁波的发射和接收实验,把这一深深影响我们当代生活的理论由假设到最终确立。科学技术的进步离不开物理学理论和实验。作为科技工作者,对物理知识和实验技能的掌握必不可少。

大学物理实验是理、工和农科学生必修的一门基础课程。是学生进入大学后较早接触的一门实验课程,它将使学生受到系统的物理实验方法和实验技能的训练,并了解科学实验的主要过程和基本方法,为今后的科学实验活动奠定初步基础。同时,物理实验把理论与实际、方法与技能结合起来,促使学生既动手又动脑,在实践中学习,培养创新精神和科学实验能力。整个教学活动的进行,将有助于学生知识、能力和素质的培养与提高。通过物理实验,至少可使学生具有以下几方面的能力:①通过具体实验,学习实验的基本方法和一定的操作技能;②通过阅读教材和资料,做好实验前准备,能概括出实验原理和设计要点;③学会正确使用常用仪器;④正确记录和处理实验数据,分析实验结果,撰写实验报告;⑤能完成简单设计性实验,从具体实验中,体会每个实验的基本设计思想、实验手段和实验方法。

基于物理实验的重要性,欧美大学在19世纪末就建立起物理实验室。我国起步稍晚,在1918年开始了物理实验的教学。近二十多年来,物理实验得到更普遍的重视,很多高校都把物理实验从大学物理课程里分离开来,单独设立为一门基础课,而且也加大了实验方面人力、财力的投入,很多综合性大学都建立了物理实验教学中心。

二、物理实验课程的基本教学程序及其基本教学要求

学好物理实验,必须遵循物理实验本身的特点和规律.物理实验有自己的实验理论、实验方法和实验技能,物理实验课程的学习一般分三个阶段进行.

1. 实验前的预习

学生进入实验室做实验之前,必须认真阅读实验教材,理解实验的基本原理,了解仪器的工作原理和用法,掌握实验的基本内容和步骤,以便在实验过程中,能及时、迅速、准确地测得实验数据.因此,我们要求课前要写好预习报告,否则不允许进入实验室做实验.

预习报告包括以下几方面的内容:

(1) 实验目的.说明所做实验的目的和学习要求.

(2) 实验原理.写出本实验中获得实验结果所依据的主要公式,并说明公式中各物理量的意义、单位和公式适用的条件及测量方法.必要时应画出所需的原理图(如电路图、光路图或装置系统示意图等).

(3) 实验仪器.列出本实验所用的主要仪器(对其结构、原理及性能有初步的了解).

(4) 实验步骤.根据实验内容,简要拟定测量的计划、实验步骤或操作顺序.

(5) 数据表格.按照实验的内容,画好记录各项实验数据的表格.在条件允许的情况下,利用实验室开放时间,能对照仪器仔细阅读有关资料,或通过校园网的物理实验中心网络平台,进一步熟悉仪器使用方法和理解实验原理,以便能更加主动地、独立地做好实验.

注意:预习报告必须使用学校统一的实验报告纸,将以上五项内容分别写在“实验原始记录”和“实验报告”的报告纸上.报告的具体形式可以参考附录 I.

2. 课堂实验

学生应按时进入实验室,交实验预习报告给教师检查,按分组就位,并在原始记录的实验组号上写上实验桌上的编号,在“同组人”处写上合作同学,熟悉实验条件,并在教师的指导下(或独立地)进一步明确实验的有关原理、方法、步骤及注意事项.然后检查仪器、材料是否完好、齐备,筹划仪器的布局 and 操作的分工(当有合作者时),再根据实验要求正确地将有关仪器组装成所需的测试系统.经检查确保无误(需经教师认可),便可按步骤进行实验操作.

做实验时,要正确地调试仪器,仔细观察和分析现象,控制过程,测量有关物理量.要根据仪器的精度和实验条件正确运用有效数字,及时如实地记录测量数据,防止出现差错或遗漏.

测量数据时必须认真、仔细.一要保证数据的真实性,二要保证应有的精确度.当对测量结果不满意时,应分析原因,改善条件,重新测量;不允许无根据地修改实验数据.原始数据要用钢笔或圆珠笔记录(不允许用铅笔记录),如果是记错了,也不能涂改,而要轻轻画上一道痕迹,在旁边写上正确的值(错误多的需重新画表记录),并让教师在此处签字.测量结果的优劣将影响实验的成败.

两人合作时,要合理分工,适当轮替,配合得当,协调一致,共同达到实验要求;忌一人懈怠或一人包办.

实验完毕,应将所测得的数据交给教师审阅.经教师认可后,再记下实验实际所用的仪器名称、型号、规格和编号等,细心收拾仪器,保持实验台整洁,保证不留事故隐患,然后才能离开实验室.

3. 撰写实验报告

实验报告是实验工作的总结,是实验结果的文字记录,一份成功的实验报告能给予同行或老师以清晰的思路、见解和新的启迪.实验报告的撰写,要求简洁明了、工整规范、文字通顺、记载清楚、数据齐全、图表正确美观、结论明确、分析全面,数据处理包括计算、作图、误差分析.计算要有计算式,代入数据要有根据.即使实验原始数据相同,不同的实验报告者也可体现自己的风格,体现自己独到的发现,切忌抄袭别人的成果.

实验报告要用统一印刷的报告纸来书写,包括以下内容:

- (1) 实验名称
- (2) 实验目的.说明所做实验的目的和学习要求.
- (3) 实验仪器.列出使用仪器的名称、型号、规格、精度等.
- (4) 实验原理.简要叙述有关原理,包括电路图、光路图或实验装置示意图,理论依据、主要公式及简要推导过程.
- (5) 实验数据记录和处理.实验测得的原始数据要用表格或其他形式简洁明了地列出,正确表示有效位数和单位,对测量数据进行计算或作图,并进行误差或不确定度评定,计算要写出主要计算内容,写出实验结果并作出完整的数据处理表格.
- (6) 分析讨论.包括实验现象分析、关键问题的研究体会、实验误差的主要来源、对实验仪器选择和实验方法改进的建议、实验异常现象的解释、回答实验思考题等.

实验报告是进行学生实验考核的主要依据,必须严肃对待,认真完成.

第一部分 物理实验的基础知识

第一章 物理量的测量、误差及数据处理的基础知识

本章围绕测量、误差、测量结果的表示及实验的数据处理等方面介绍其基本的知识,作为实验前的基础准备. 这些知识在每次实验中都要用到,是必须了解和掌握的. 相信掌握好本章的内容,对学习物理实验和今后从事科学实验工作都具有重要意义.

第一节 测量、误差、不确定度的基本概念

一、测量

(一) 测量

物理学不断向前发展的动力之一就是物理实验,而物理实验的基础和中心环节之一则是数据测量. 为此,有必要了解测量的基本知识.

1. 测量

测量即借助专门的工具、仪器,将被测对象直接或间接地与同类量的标准量单位进行比较,用该标准量的倍数表示待测量的数值,其计量单位就是以该标准量为单位. 可见物理量的测量结果由数值和单位组成.

2. 基本单位

按照现行国际通用的计量单位规定,物理量的单位是以国际单位制(SI)为基础的,其中米(长度单位)、千克(质量单位)、秒(时间单位)、安培(电流强度单位)、开尔文(热力学温度单位)、摩尔(物质的量单位)和坎德拉(发光强度单位)是七个基本单位,另外再加上辅助单位,即弧度(平面角单位)和球面度(立体角单位),其他量的单位由基本单位及辅助单位导出,称为导出单位.

3. 分类

按照测量的方式,可将测量分为直接测量和间接测量. 所谓直接测量是指被测量可以直接从测量仪器或量具上读出其数值的测量. 例如用米尺测量长度,天平称质量,停表记时间,安培表测电流,等等,都是从仪器上直接读出该量的大小,都属于直接测量;而间接测量则是指被测量不能用直接的方法得到,而是利用若干个直接测量的量值通过一定的函数关系计



算出被测量的数值,这种测量称为间接测量.例如单摆法测重力加速度 g ,是通过测量 T 和 l 两个直接测量量通过式 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ 算出,显然, g 为间接测量物理量.在物理实验中有的量只能用间接测量才能得到其值,而有的量既可用间接测量得到,也可用直接测量得到.例如测液体的密度,若先测出液体的体积和质量,再根据密度公式算出 ρ 的值,则 ρ 的测量是间接测量.如果用密度计测量,直接读出 ρ 的值,这时 ρ 的测量是直接测量.所以,一个被测量量的数值采用哪种测量方法得到,要视实验的具体情况和要求而定.

(二) 误差

1. 误差的定义

如果测量对象本身不变,那么对于一个被测的物理量,客观上存在一个真实的确定数值,称为真(实)值.然而在实际测量时,由于测量条件、实验方法、仪器精度的限制不够完善,以及实验人员的技术水平等原因,使得测量值与客观上存在的真值之间有一定的差异,我们定义测量值(x)与被测量的真值(α)之差称为测量误差 Δx ,记为

$$\Delta x = x - \alpha \quad (1)$$

它反映了测量值偏离真值的大小和方向.

真值是一个理想概念,通常不可能确切地知道.为了实际工作的需要,人们采用约定真值来近似地代表真值.所谓约定真值是指它非常接近真值,如在我们所研究的领域内,用标准设备对被测量所测得的量值,一般常称之为实际值 x_0 .

根据上述定义,有时为了使用方便,又提出了一个新的概念,即修正值(或称更正值),用符号 e 表示,并有如下关系:

$$x_0 = x - e \quad (2)$$

此式的物理意义是:当用某种仪器去测量一个物理量时,得到一个测得值 x ,如果已知该仪器在该示值 x 处的修正值为 e ,则这一被测物理量的实际值 x_0 是测得值与修正值之差.

2. 误差的性质和分类

误差按其性质及规律可以分为系统误差和随机误差两类.

(1) 系统误差

在相同的条件下多次重复测量同一物理量时,若每一次测量值总比真值偏大或偏小一个固定的量值,或者按一定的规律而变化,具有这种特点的误差可称为系统误差.

系统误差的来源是多方面的,如实验仪器的缺陷、测量方法和理论的不完善、测量者的个人习惯等都会引起这种误差.当然以上各种误差来源通常是同时起作用的.

(2) 随机误差

在测量时,即使排除了产生系统误差的因素,在相同条件下,对同一物理量进行多次重复测量,各次测量值都会有些差异,误差的大小和正负随机变化,这种误差就是随机误差,又称偶然误差.它是由于实验条件 and 环境因素的微小变化、测量者的生理分辨能力及操作熟练程度等多方面的影响而产生的.

进行单次测量时,随机误差是没有任何规律的,既不可预测,也无法控制.但是,就多次

测量来说,随机误差的出现和分布服从一定的统计规律,通常符合“正态分布”,如图 1 所示。

服从正态分布规律的随机误差具有以下四大特征:

(1) 单峰性. 绝对值小的误差出现的可能性比绝对值大的误差出现的可能性大。

(2) 对称性. 绝对值相等的正误差与负误差出现的可能性相同。

(3) 有界性. 非常大的正误差或负误差出现的可能性几乎为零。

(4) 抵偿性. 当测量次数非常多时,正误差与负误差互相抵消,于是随机误差的代数和趋近于零。

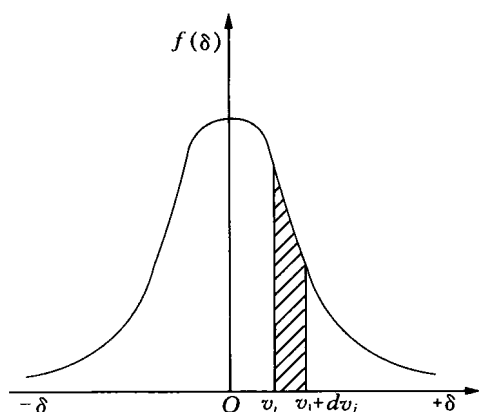


图 1

除上述两种性质的误差外,我们经常把由于测量过程中读数、记录发生的差错,以及仪器损坏、操作不当等造成测量上的错误称为粗差,又称过失误差. 在数据处理时,应按一定的原则对这类异常数据加以剔除。

需要指出的是,系统误差与随机误差之间没有严格的分界线. 误差的性质在一定的条件下可以相互转化。

(三) 测量不确定度

任何测量过程中都存在误差,误差是测量值与真值之差,真值不能确切地知道,则误差也无法确定. 因此需要引入一个新的术语——测量不确定度,简称不确定度,它用于对被测量的真值在某个量值范围的评定. 根据这个定义,不确定度是作为估计值而言的,用以合理地表征被测量值的分散性。

(四) 精密度、正确度和准确度

精密度、正确度、准确度是评价测量结果好坏的三个术语。

精密度 表示对同一被测量作多次重复测量时,各次测量值之间彼此接近的程度. 精密度高,说明重复性好,各次测量误差的分布密集,即随机误差小(但系统误差的大小不明确). 它是反映随机误差大小的术语。

正确度 表示测量值与真值接近的程度. 正确度高,说明测量值接近真值的程度高,即系统误差小. 可见,它是反映测量结果系统误差大小的术语。

准确度 用于综合评定测量结果与真值接近的程度. 准确度高,说明精密度和正确度都高,它反映随机误差和系统误差的综合效果. 因此准确度又称精确度。

现以打靶为例来形象区别这三个“度”,如图 2 所示,表示各射击子弹偏离靶心的情况。

在实验中,由于要求尽可能地消除或减小系统误差,误差计算主要是估算随机误差,因此,往往不再严格区分精密度和准确度,而泛称为精度。

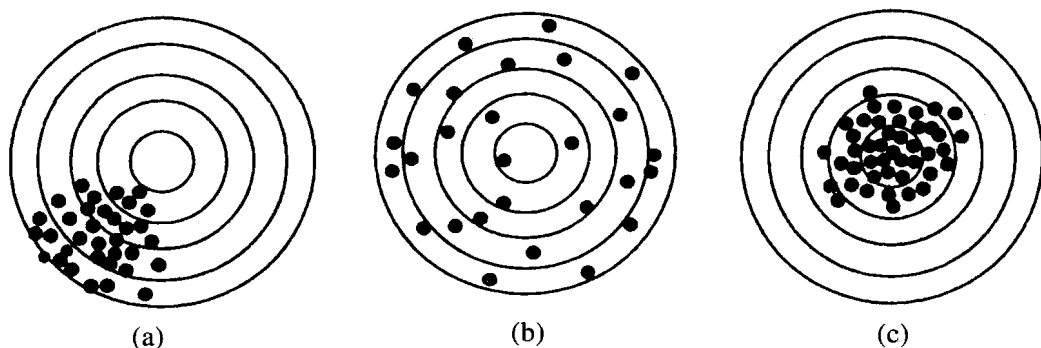


图2 (a)精密度高,准确度低 (b)准确度高,精密度低
(c)精密度、正确度和准确度皆高

第二节 测量结果的表达

测量结果的表达是以误差理论为核心的,但因以数理统计的概率论为基础的误差理论,涉及的数理基础比较广,深入讨论它已超出了本课程的范围.因此,本节只能着重介绍一些概念,引用一些结论和计算公式,以满足本课程教学的需要,不进行严密的数学论证.

一、直接测量结果的表达方法

(一) 直接测量结果中随机误差的估计和表示

1. 随机误差的表示

(1) 多次测量的算术平均值

设在等精度(即相同)条件下对某一物理量 α 进行了 n 次独立的直接测量,所得 n 个测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 各次测量相应的随机误差为

$$\Delta x_1 = x_1 - \alpha, \Delta x_2 = x_2 - \alpha, \dots, \Delta x_n = x_n - \alpha$$

上述各式两边求和,得

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = \sum_{i=1}^n (x_i - n\alpha)$$

两边除以 n ,得

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - n\alpha)$$

根据随机误差的抵偿性,当测量次数很多时,有

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty)$$

$$\text{于是得 } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \rightarrow \alpha$$

上式表明,当对一系列等精度重复测量所得的测量值,消除了它的系统误差之后,计算得到的算术平均值最接近于真值.因此一般应把测定值的算术平均值当作被测量的最可信赖的值,称为测定值的最佳值或约定真值,表示为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

(2) 多次测量结果的平均绝对误差

把各次测量值与平均值 $\bar{x}$ 之差,代表各次测量的偶然误差.因取其绝对值,故也叫各次测量的绝对误差,即 $X = |x_i - \bar{x}| (i=1, 2, \dots, n)$. 取它们的算术平均值,称为平均绝对误差,又称算术平均误差,以 $\overline{\Delta x}$ 表示.

$$\overline{\Delta X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i \quad (4)$$

(3) 标准偏差

依据误差理论,系列测量中单次测量的标准偏差 σ (又称为均方根误差) 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} (\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \dots + \Delta x_n^2)} \quad (5)$$

其中, Δx_i 表示 n 次测量中第 i 次的测量误差.

有限次 (n 次) 测量列中的某一次测量结果的标准偏差 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]} \quad (6)$$

上式又称为贝塞尔公式. 它表示某次测量值的随机误差在 $-\sigma \sim +\sigma$ 之间的概率为 68.3%. 由式(6)可以看出,当 $n=1$ 时, σ 的值是不定的,故测量一次不能用式(6)进行计算;一般来说,至少要五次以上的测量才能用此公式进行计算.

(4) 算术平均值的标准偏差

上文给出了单个测量值的标准偏差. 现在就来研究用算术平均值表示测量结果时,标准偏差的计算.

由(3)式可知,有限次等精度重复测量的算术平均值为

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

由于是等精度测量,故对于每个测得值而言,它们的标准偏差都应该相等,

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_n = \sigma$$

因为每个测得值对于总的测量结果只有 $\frac{1}{n}$ 的贡献,故每个测得值的标准偏差给总的测量结果的标准偏差的贡献为 $\frac{1}{n}\sigma$.

如果对多次测量结果的误差采用均方根合成法,则算术平均值的标准偏差为

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{n}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{n}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\sigma_n}{n}\right)^2} = \sqrt{\frac{n}{n^2} \sigma^2} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

再结合式(6),可得

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (7)$$

由式(7)算术平均值的标准偏差 $\sigma_{\bar{x}}$ 要比单个测得值的标准差缩小 $\sqrt{n}$ 倍. 而且随着测量次数 n 的不断增加, $\sigma_{\bar{x}}$ 的值将不断缩小, 即测量结果的精密度越高. 因此, 增加测量次数可以减小随机误差. 但是, 由于 $\sigma_{\bar{x}}$ 是与 n 的平方根成反比, 当 n 增大到一定时 $\sigma_{\bar{x}}$ 的减小就不太明显了. 故在实际测量工作中, 并不是测量次数越多越好. 因为增加测量次数必定要延长测量时间, 这将给保持稳定的测量条件带来困难, 同时也引起观测者的疲劳, 从而可能带来较大的观测误差. 另外, 增加测量次数只能对降低随机误差有利而与系统误差的减小无关.

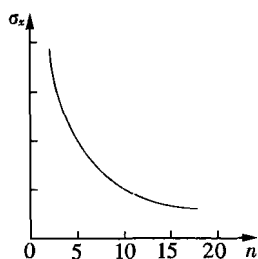


图 3

误差理论指出, 随着测量次数的不断增加, 随机误差的降低越来越缓慢. 图 3 表示算术平均值的标准偏差 $\sigma_{\bar{x}}$ 随测量次数 n 的变化情况, 可以看出, 当测量次数 $n > 10$ 后, $\sigma_{\bar{x}}$ 的减小极慢. 所以, 在实际测量中次数不必过多, 在科学研究中一般取 10~20 次, 而在物理实验中一般取 5~10 次.

(5) 相对误差

相对误差是指某一物理量的绝对误差与其真值或实际值之比. 通常都以百分比的形式来表示, 即

$$\text{相对误差}(E) = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值(或实际值)}} \times 100\% \quad (8)$$

在实际工作中我们通常用理论值或公认值或标准值或测量的最佳值代替真值.

由上述可知, 测量误差可以用绝对误差表示, 也可以用相对误差表示. 如果待测量的理论值或公认值已知, 也可用百分误差表示测量结果的好坏, 即

$$\text{百分误差}(\gamma_0) = \frac{\text{测量值} - \text{公认值}}{\text{公认值}} \times 100\% \quad (9)$$

(二) 直接测量结果表达

1. 直接测量结果的一般表达

在物理实验教学中, 常常将多次测量的测量结果表示为

$$x = (\bar{x} \pm \Delta \bar{X}) (\text{单位}) \quad (10)$$

$$\text{或 } x = (\bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}}) (\text{单位}) \quad (11)$$

需要说明的是: 平均绝对误差与标准误差都可作为测量误差的量度, 它们都表示在一组多次测量的数据中各个数据之间分散的程度. 基于平均误差具有计算比较简单的优点, 容易为初学者掌握, 而且在初学阶段对学生的主要要求是形成误差的概念, 对实验进行粗略的、简明的分析. 因此, 在物理实验的初期教学中常常采用平均绝对误差来进行误差的分析和运算. 但在科技研究及学术文献中则一般采用标准误差来表示随机误差, 更高的要求则需要用下节中不确定度来描述误差. 希望同学们在今后的实验结果中用标准误差来表示随机误差.