

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学基础物理实验

朱红妹 张义邴 张金仓

 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学基础物理实验

DAXUE JICHU WULI SHIYAN

朱红妹 张义邴 张金仓



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

内容提要

本书是作者在多年物理实验教学、实践和教学研究的基础上,结合目前本科物理实验教学的新特点编写而成的,其内容分层次安排,面向广大非物理专业的理工科学生。全书分为两部分,第一部分是大学物理实验基础知识,重点介绍误差理论和实验数据处理,并兼顾力、热、电、光实验的基本知识。第二部分按基础器具和仪表使用、基本物理量测量、基本实验技能、综合和设计性实验的顺序编排了36个实验。本书试图将实验教材和实验指导书合二为一,便于学生在实验前预习和实验过程中参考。

本书可作为一般理工科大学基础物理实验课的教材或参考书,也可供相关实验技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学基础物理实验 / 朱红妹, 张义邴, 张金仓主编.

— 北京: 高等教育出版社, 2012. 10
ISBN 978-7-04-033784-6

I. ①大… II. ①朱… ②张… ③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(2012)第209542号

策划编辑	高聚平	责任编辑	高聚平	封面设计	于文燕	版式设计	马敬茹
插图绘制	尹莉	责任校对	王雨	责任印制	韩刚		

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社址	北京市西城区德外大街4号	网址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印刷	高教社(天津)印务有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
开本	787mm × 960mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印张	20.5	版次	2012年10月第1版
字数	370千字	印次	2012年10月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定价	32.10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 33784-00

序 言

物理学本质上离不开物理实验,不管是实验先发现再提出理论,还是理论先预言再用实验证实,各种自然现象、变化规律总要通过物理实验再现、探测、总结、抽象,物理学的规律、理论最终都将接受实验和实践的检验,所以物理实验在物理学各学科中具有重要地位.大学基础物理实验是培养大学生基本物理实验技能、物理实验基础知识、物理实验数据科学记录和分析处理、并适当掌握综合性实验和设计探究性实验的公共基础课程.

本书取名《大学基础物理实验》正是基于以上定位,教材编写也遵循了以上原则.教材是在上海大学教师多年物理实验教学、教学实践和教学研究的基础上编写而成的.1994年新上海大学组建后,原上海工业大学、上海科技大学、上海科技高等专科学校和原上海大学各普通物理实验教研室合并,1999年正式成立物理实验中心,统一安排大学物理实验教学,在原有实验教材、讲义、实验指导书基础上统编了《大学物理实验》第一、第二版(董传华等,上海大学出版社).进入21世纪,中国高等教育逐步引入并践行通识教育理念,部分高校进行了突破性的改革,2011年秋季学期开始,上海大学对入学新生实行全新教育模式,通识教育理念不仅涉及课程体系的改革,实际上也贯穿到每门课程授课内容、方法的变动.在这样的背景下,《大学基础物理实验》教材历时2年应运而生,物理实验中心几乎每位老师包括已退休的部分教师都为之付出了心血.本教材主要突出了以下特点:

1. 普适学习.实验避免深层的物理背景知识和繁琐的数学推导,并使实验内容和步骤尽可能详细,使各类高考入学学生都能动手完成实验,掌握基本物理实验知识和技能,甚至希望学生借助各类多媒体教学辅助系统,能够自主完成实验学习.

2. 技能训练.本教材希望学生进入实验室后得到更多物理实验技能的培养,所以简化了数据记录量,把更多时间花在实验操作上,如牛顿环实验中把10环数据3次测量改为20环数据1次测量;单缝衍射实验中光强分布-3级暗纹到+3级暗纹改为仅描绘0级极大到3级暗纹,缝宽测量中改为单次测量;部分实验分A、B方案等.

3. 基本要求.结合目前我国高等学校本科物理实验教学的特点,突出基本

的器具和仪表使用、基本物理量测量、基本实验技能的教学要求。

4. 章节分类. 为适应不同的教学要求或学生选修目标实验, 本书分类有别于以往教材, 第一章为基础物理实验知识, 重点介绍误差理论和实验数据处理, 并兼顾力、热、电、光实验的基本知识; 第二章为基本器具和仪表使用; 第三章为基本物理量测量; 第四章为基本实验技能; 第五章为综合和设计性实验。

同时, 本书在突出物理概念方面作了很多探索, 如绝热法比热测量实验就直接从比热的定义出发组建实验项目, 未来我们努力加入更多类似的实验. 张金仓对本教材作了统稿、审编, 董传华对编写提出了指导意见, 参加本教材编写的有朱红妹(第一章, 第四章实验 14、20、23、25、26), 张义邴(第二章实验 1, 第三章实验 6, 第四章实验 17、22、24, 第五章实验 28、30), 陈杭德(第四章实验 15、16、21), 秦晓玲(第二章实验 3、5, 第五章实验 34), 盛雷梅(第三章实验 9, 第四章实验 18、19), 安康(第二章实验 2, 第三章实验 8, 第五章实验 33), 向兰(第三章实验 7、12, 第五章实验 36), 陆江(第五章实验 31), 马洪良(第二章实验 4, 第五章实验 35), 耿在斌(第五章实验 27、29), 周霞菲(第三章实验 10、13), 熊建国(第五章实验 32), 钟敏建(第三章实验 11). 编写过程中钟敏建提供了不可多得的背景资料, 陆江对大量绘图做了修订, 高等教育出版社的高聚平给予了大力支持和无私奉献, 作者一并在此表示衷心感谢。

编著者 于上海大学

目 录

第一章 大学物理实验基础知识	1
§ 1.1 物理实验和大学物理实验	1
§ 1.2 误差的定义、分类和简要处理方法	4
§ 1.3 不确定度和实验结果的表示	13
§ 1.4 直接测量结果的不确定度估计	15
§ 1.5 间接测量结果的不确定度估计	19
§ 1.6 实验数据的有效位数与修约	23
§ 1.7 数据处理的基本方法	29
§ 1.8 物理实验的基本仪器	34
练习	50
第二章 基础器具、仪表使用	54
实验一 长度/体积/质量/密度测量与测量不确定度	54
实验二 电阻的测定——电桥法	59
实验三 电位差计的使用——校正电压表	69
实验四 示波器的使用	78
实验五 分光计的调节和三棱镜顶角的测定	90
第三章 基本物理量测量	101
实验六 不规则物体密度的测量	101
实验七 速度、加速度和重力加速度的测定——气垫导轨法	107
实验八 空气比热容比的测定	121
实验九 透镜焦距的测量	128
实验十 用落球法测量液体的粘度	135
实验十一 用霍尔元件测量磁场	139
实验十二 静电场的描绘——模拟法	147
实验十三 用三线摆测物体转动惯量	154

第四章 基本实验技能	161
实验十四 光的干涉——牛顿环	161
实验十五 衍射光栅	167
实验十六 静态拉伸法测量固体材料的杨氏模量	177
实验十七 <i>RLC</i> 串联电路暂态特性	186
实验十八 平行光管的调整和使用	194
实验十九 迈克耳孙干涉仪的使用	197
实验二十 冷却法测量金属的比热容	203
实验二十一 超声波在空气中传播速度的测量	212
实验二十二 光拍的传播和光速的测定	223
实验二十三 灵敏电流计特性研究	230
实验二十四 单缝衍射	241
实验二十五 单色仪定标	247
实验二十六 电表内阻与补偿法测电压	252
第五章 综合、设计性实验	257
实验二十七 夫兰克-赫兹实验	258
实验二十八 安培力特性实验	262
实验二十九 光电效应和普朗克常数测定	270
实验三十 绝热法金属比热容测量实验	274
实验三十一 密立根油滴实验	282
实验三十二 被动式(热释电)红外传感实验	290
实验三十三 误差分配和实验仪器的选择	297
实验三十四 电位差计测定电阻	301
实验三十五 变阻器在电路中的应用	304
实验三十六 简谐振动研究——弹簧劲度系数测定	312

第一章 大学物理实验基础知识

§ 1.1 物理实验和大学物理实验

1.1.1 实验在物理学中的地位和作用

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的自然科学。物理学从本质上来说是实验科学,物理概念的提出、物理规律的发现都是以客观实验为基础的;理论上的假设或推理,要最终成为被公认的物理规律,必须有实验结果的验证。在物理学的发展进程中实验物理和理论物理密切相关,互相促进。

1.1.2 教学实验和科学实验的关系^①

上面所指的实验是科学实验,是为了预测、验证或获取新的信息,在理论的指导下有目的地运用一定的物质手段,观察和探索研究对象有关规律和机制的一种研究方法。其全过程应包括四个环节:第一步,选定目标作出计划,即确定课题,构思模型,给出实验方案;第二步,制作或选择实验装置,按实验方案准备实验所需的仪器;第三步,观察现象和测量数据;第四步,整理、分析数据,得出结论并写出报告。科学实验是探索的过程,是可能成功也可能失败的,结果是可能符合预期也可能否定预期的,当然还可能有意收获,而得到未曾预期的成功。每一次科学实验的成功都揭示出自然界的奥秘,使人类在认识自然的道路上又前进一步。

教学实验是以教学为目的,其目标不在于探索,而在于培养人才,是以传授知识,培养人才为目的。因此教学实验(尤其是基础教学实验)与科学实验无论从目的、内容和形式都有区别,教学实验一般都是理想化的,排除了次要干扰因

^① 吴泳华,霍剑青,熊永红. 大学物理实验. 北京:高等教育出版社,2001.

素而简化过的,是经过精心设计准备的,是能够成功的.一般基础教学实验只做科学实验中的第三、第四步,高年级学生会涉及第一、二步.尽管如此,教学实验的地位仍然是非常重要的.

1.1.3 物理实验课程的地位、作用和任务^①

物理实验课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,是大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.

物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力、提高科学素质的重要基础.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.

本课程的具体任务是:

1. 培养学生的基本科学实验技能,提高学生的科学实验基本素质,使学生初步掌握实验科学的思想和方法,培养学生的科学思维和创新意识,使学生掌握实验研究的基本方法,提高学生的分析能力和创新能力.

2. 提高学生的科学素养,培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风,认真严谨的科学态度,积极主动的探索精神,遵守纪律,团结协作,爱护公共财产的优良品德.

1.1.4 大学物理实验的教学环节

大学物理实验是学生在教师指导下独立进行实验的一种实践活动,每个物理实验的教学一般包含3个环节.

1. 课前预习

实验预习是为实验操作而准备的,学生通过预习要明确三个问题:做什么?怎么做?为什么?预习的好坏,不仅影响到学生能否顺利完成实验,而且会在很大程度上决定接受实验训练的质量和收获的大小.

实验操作课前学生要阅读实验教材,了解实验目的、实验原理、主要仪器及使用方法、注意事项、实验内容和步骤.对于预习过程中遇到的问题,学生可查阅其他相关参考资料或通过网络寻求帮助;对于预习中未解决的问题要做好记录,在进入实验室后再向实验指导教师请教.然后完成预习报告,预习报告写在“预习报告”纸上,主要包括以下几个部分:

^① 理工科类大学物理实验课程教学基本要求.

- (1) 实验名称
- (2) 数据记录表格
- (3) 预习思考题

2. 实验操作

实验操作是整个实验教学中最重要的一个环节,是培养学生动手能力、分析问题和解决问题能力的好时机,学生应在教师指导下独立完成。

学生进入实验室后应将预习报告放在桌上待指导教师检查,向老师提问预习中未弄懂的问题,另外在老师解答其他同学的提问时也要认真听取. 学生要记住实验前老师的提醒,明确仪器的操作方法和注意事项后开始实验操作,一般应先定性测量,注重观察实验现象,对要测量的范围有大致的估计;再定量测量,实事求是地记录实验现象和数据,实验数据要记录在预习报告的数据记录表格中. 在实验过程中,学生如果有问题要主动问指导教师。

实验完毕,将预习报告送指导教师审阅(暂时保留仪器装置,有时需要补测数据),老师认可签字后,再拆除线路、整理仪器(把凳子放在桌子下面),并做好卫生清洁工作。

3. 实验报告

写实验报告是为了培养和训练学生以书面形式总结实验工作和报告实验成果的能力. 实验报告实际是实验的全面总结,是再提高的过程. 实验报告要求字迹端正,文理通顺而又简明扼要,图表规范,数据完备和结论明确. 实验报告写在“实验报告”纸上,主要包括以下几个部分:

- (1) 实验名称
- (2) 实验目的
- (3) 实验仪器 仪器和用具名称及主要规格(包括型号、量程、分度值、精度等).
- (4) 实验原理 主要包括实验的理论根据或重要的实验方法,简单扼要,要写出实验原理所对应的公式表达式、公式中各物理参量的名称和物理意义、公式成立的条件,画出简单原理图等. 不要照抄书本,应按自己的理解用简练的语言来概括.
- (5) 实验数据 在原始数据记录表格的基础上设计新的表格,表中要反映原始测量数据和必要的中间运算数据,写明物理量和单位.
- (6) 数据处理和实验结果 测量结果的计算包括测量值的计算和不确定度估算及图示图解,要求列出数据处理过程. 最后完整表达测量结果.
- (7) 分析讨论 内容没有具体规定,可以对实验过程中观察到的现象和遇到什么困难及数据处理中的问题,发表自己的观点. 如实验中观察到什么反常现

象?从预习到实验操作遇到什么困难?自己是怎么解决的?能否思考出供以后同学或实验人员借鉴的东西?对实验结果是否满意?如果没有达到可能达到的结果,是什么原因?对实验方法的哪一点特别感兴趣,有启发?对实验改进有何设想?实验步骤怎样安排更好?做完实验想到什么新的设想?也可以回答书后的讨论题.提倡有的放矢,切忌泛泛而谈.

“实验原理”和“数据处理与实验结果”是实验报告的重点,在基础实验阶段,“分析讨论”不强求所有学生都要完成.

实验报告应在实验后一周内完成,并在下次实验课时(连同预习报告一起)交实验指导教师.

设计性实验实验报告包括:

- (1) 实验名称
- (2) 实验目的
- (3) 实验仪器
- (4) 设计与要求
- (5) 设计过程
- (6) 实验数据
- (7) 数据处理和实验结果
- (8) 分析讨论

§ 1.2 误差的定义、分类和简要处理方法

以确定被测对象量值为目的的全部操作叫测量,它是物理实验的基础.测量是用实验的方法,直接或间接地将被测量(未知量)与已知的标准量进行比较,以得到被测量的具体数值,达到对被测量定量认识的过程.例如,一桌子的长度与米尺比较,得出桌子的长度为 1.25 m.在物理实验中,不仅要明确测量对象,选择恰当的测量方法,正确地完成测量操作的各个步骤,还要学习误差理论和实验数据处理的基本概念,对多数实验测量表示出完整的测量结果.

完整的测量结果必须包括数值和单位(只有极少数的物理量如折射率 n 是一个纯数).此外还应给出对测量结果精确程度的评价,一般应给出扩展不确定度.例如,某透镜焦距的测量结果的正确表达为

$$f = (25.15 \pm 0.05) \text{ cm}$$

25.15 为被测量的值,0.05 为扩展不确定度,cm 为单位.上式的含义是:被测量透镜焦距 f 的真值有相当大的可能($\geq 95\%$)位于区间(25.10,25.20) cm 之内.

按测量值获取方法的不同,测量可分为直接测量和间接测量.

1.2.1 直接测量

直接测量是指用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量,例如用米尺测量长度;用天平称质量;用秒表记时间;用温度计测量温度;用电流表测量电流.

1.2.2 间接测量

间接测量是指被测量与若干个直接测量的物理量有一定的函数关系,先由直接测量获得可以直接测量的物理量的大小,再代入一定的函数关系式计算出被测量的结果.例如,测量圆柱体的体积,先直接测量圆柱体的直径 d 和高度 h ,再代入公式 $V = \frac{1}{4} \pi d^2 h$ 计算出圆柱体的体积.大多数的物理量都是由间接测量来测量.

1.2.3 等精度测量

同一个人,用同样的方法,使用同样的仪器并在相同的条件下对同一物理量进行的多次测量叫等精度测量.

1.2.4 测量误差的定义

在一定条件下,被测物理量的大小有客观存在的真实值,称为“真值”.测量的目的是希望知道被测物理量的真值是多少.由于测量仪器只能准确到一定程度,测量所依据的理论有近似或实验方法不十分完善,环境条件不稳定,测量人员操作和读数不能十分准确等原因,使得测量值 x 只是真值 x_0 的近似值.从理论上讲,可以通过不断改进实验方法,提高仪器的准确度和实验人员技术水平,使测量值 x 无限接近真值 x_0 ,但永远不可能等于真值,因此真值是不可知的.同一待测物理量用不同的实验手段获得的测量值 x_i 都是真值的近似值,但近似程度不一样,即各测量值 x_i 的可靠程度或可信赖程度不一样.不知道可信赖程度的测量值是没有意义的.定义测量值与真值之差为测量误差.

$$\varepsilon(\text{误差}) = x(\text{测量值}) - x_0(\text{真值})$$

误差 ε 反映了测量值偏离真值的大小和方向(正负).由于真值是不可知的,所以误差也不能确切知道,必须对误差进行估算,从而了解误差对测量结果的影响.这就需要用误差理论对误差进行分析,一方面对测量误差作出正确的定量估计,另一方面指导我们在实验过程中设法减少测量误差对测量结果的影响.

根据误差产生的原因和性质的不同,误差可分为系统误差和随机误差两类.

1.2.5 系统误差

在同一被测量的多次测量过程中,保持恒定或以可预知的方式变化的测量误差分量称为系统误差.

【例 1.2.1】 螺旋测微计测量圆柱体直径 d ,测得值为 15.007 mm,测量前螺旋测微计零点读数为 0.005 mm,则将产生 0.005 mm 的系统误差.

【例 1.2.2】 用伏安法(内接法)测量电阻,如图 1-2-1,由于电流表有内阻 R_g ,电压表的读数包含了被测电阻两端的电压和电流表两端的电压,如果用电压除以电流计算电阻测量值($R=U/I$),会产生大小为 R_g 的系统误差.

【例 1.2.3】 用受热膨胀的钢质米尺测量长度时,读数就小于其真实长度.

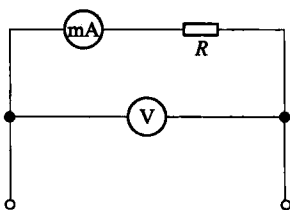


图 1-2-1 伏安法测电阻

1. 系统误差的来源

仪器:由于仪器本身的缺陷造成的,如仪器的零点不准,仪器水平未调整好.

理论:由于测量所依据的理论公式本身的近似性,或实验条件不能达到理论公式所规定的要求,或者是实验方法本身不完善所带来的误差.例如,伏安法测电阻时没有考虑电表内阻对实验结果的影响等.

人员:由于观测者个人感官和运动器官的反应或固有习惯不同而产生的误差,它因人而异,例如:观测者对准标志线读数时习惯偏左或偏右.

环境:没有按规定条件使用仪器,外界环境(光线、温度、湿度、电磁场等)对测量仪器的影响等所产生的误差.

2. 系统误差的处理

系统误差的特点是在相同测量条件下多次测量同一物理量时,系统误差的绝对值和符号保持恒定,因此多次测量不可能发现系统误差,容易在不知不觉中把它遗漏,我们要重视系统误差.

按对系统误差的掌握程度,系统误差可分为已定系统误差和未定系统误差.

已定系统误差是指在一定条件下,采用一定方法,对误差符号和绝对值能确切掌握的误差分量.实验中对能消除的已定系统误差,应尽量消除,如:仪器的零点不准,实验前应先对仪器进行零点调整.对不能消除的已定系统误差,要对测量结果进行修正,修正公式为

$$\text{已修正测量结果} = \text{测量值(或其平均值)} - \text{已定系统误差}$$

如:例 1.2.1 中,对测量结果进行修正,得到圆柱体直径 $d = 15.007 \text{ mm} - 0.005 \text{ mm} = 15.002 \text{ mm}$. 例 1.2.2 中,对测量结果进行修正,得到 $R = \frac{U}{I} - R_s$.

未定系统误差是指符号和绝对值不能确切知道,而仅知道误差范围的误差分量. 实验中一般只能估计出未定系统误差的限值和其分布范围,例如一个量程为 75 mV 的 0.5 级电压表,由于表盘刻度及磁场不均匀,轴承的摩擦等原因使读数产生误差,尽管在某一刻度处的误差是可以确定的(用准确度高的表来校准),但在实际使用时,我们不可能也没必要把每一刻度处的误差都搞清楚,我们只是根据厂家给出的准确度等级来估算误差范围,误差范围为:量程 \times 级别% $= 75 \times 0.5\% \text{ mV} = 0.4 \text{ mV}$,表示在每一个刻度上的误差都不会超过 0.4 mV ,这个误差范围就是一种未定系统误差.

系统误差的处理是一个比较复杂的问题,没有通用的方法,只能给出基本的原则,需要对某个具体的实验具体分析. 系统误差的发现、消除、减少和修正属于技能问题,与实验者的经验和实际知识密切相关. 对于初学者,要逐步积累这方面的知识.

必须认识到,在系统误差不明的情况下,对随机误差的分析将毫无意义. 大学物理实验中,要重视对系统误差的分析,尽量减少系统误差对测量结果的影响. 要对已定系统误差进行修正,对未定系统误差,尽可能估计出误差的限值和其分布范围,以掌握它对测量结果的影响.

1.2.6 随机误差

在同一条件下,对同一物理量进行重复测量(等精度测量),我们会发现每次的测量值不完全相同,但又总是围绕着某个数值前后摆动,这是由于测量时存在随机误差. 随机误差是在同一被测量的多次测量过程中,以不可预知的方式变化的测量误差分量. 它是由大量的、微小的随机因素综合作用的结果. 例如,在测量过程中由于温度、湿度变化的影响,操作读数时变动的视差影响都可能引起数据的波动. 数字仪表末位取整时的随机舍入的过程,也会产生一定的随机误差. 就某一次测量来讲,随机误差的大小及正负带有随机性,无法预言,是不确定的,但对同一物理量进行重复测量(等精度测量),随机误差的分布常常服从一定的统计规律. 究竟服从什么统计规律由所研究的问题的性质决定,正态分布是一种常见的随机误差分布规律,此外还有均匀分布、泊松分布等.

1. 随机误差的特点

(1) 大小相近的正误差和负误差出现的概率相等,即绝对值相近(或相等)而符号相反的误差以同等的概率出现.

(2) 绝对值小的误差出现的概率高,而绝对值大的误差出现的概率较低,绝对值很大的误差出现的概率近于零或极少。

2. 随机误差的处理方法

随机误差的特点使我们能通过多次测量来发现它,并从测量值的统计分布规律来分析研究随机误差对测量结果的影响。

假设对同一物理量 x 进行重复测量(等精度测量),测得的测量列为: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 。

(1) 测量值的最佳估计值——算术平均值

算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

由于是等精度测量,无法判断哪个测量值更可靠。但在大多数情况下,随机误差的分布具有抵偿性。在测量次数足够多时,正、负误差可以大致相抵消。因此可以用多次测量的平均值作为被测量的最佳估计值。

(2) 用标准偏差 s_x 估算分布的标准差 σ_x

随机误差使测量值具有一定的分散性,测量值的分散性用标准误差 σ_x 表征。 σ_x 由下面的公式给出:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (1.2.1)$$

从测量值的分布情况理解, σ_x 的统计意义是:对任一次测量,测量值的大小落在 $(\bar{x} - \sigma_x, \bar{x} + \sigma_x)$ 区间内的可能性为 68.3%。 σ_x 的大小反映了测量值的离散程度, σ_x 小表示测量值密集,测量数据重复性好; σ_x 大表示测得值分散,测量数据重复性差。

从随机误差分布的角度理解, σ_x 的统计意义是:误差出现在 $(-\sigma_x, \sigma_x)$ 区间内的概率为 68.3%。 σ_x 的大小反映了随机误差分布范围, σ_x 小表示随机误差分布范围窄,测量精密度高; σ_x 大表示随机误差分布范围宽,测量精密度低。 σ_x 从概率意义上说明了误差所处的范围。

从测量值包含真值的角度理解, σ_x 的统计意义是:真值的大小落在 $(x_i - \sigma_x, x_i + \sigma_x)$ 区间内的概率为 68.3%。 σ_x 的大小反映了真值所处的范围, σ_x 小表示测量值的可靠性较高; σ_x 大表示测量值的可靠性较低。 σ_x 从概率意义上说明了真值所处的范围。

由于真值 x_0 是不知道的,标准误差 σ_x 实际上无法计算。用标准偏差 s_x 来估算 σ_x , s_x 由下面的贝塞耳(Bessel)公式算出:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.2.2)$$

它的统计意义是:真值落在区间 $(x_i - s_x, x_i + s_x)$ 内的概率约为 68.3%。

标准偏差 s_x 的大小体现了随机误差的分布特征. s_x 小表示测得值密集,测量数据重复性好,随机误差分布范围窄,测量精密度高,测量值的可靠性较高;相反, s_x 大表示测得值分散,随机误差分布范围宽,测量精密低,测量值的可靠性较低.

(3) 平均值的标准偏差 $s_{\bar{x}}$

我们知道平均值 \bar{x} 比任一次测量值 x_i 更可靠,所以我们更关心真值落在以 \bar{x} 为区间中心的某一区间内的情况,可以发现测量列的平均值 \bar{x} 也是一个随机变量,相应的平均值的标准偏差 $s_{\bar{x}}$ 为

$$s_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{n}} s_x \quad (1.2.3)$$

它的统计意义是:真值落在 $(\bar{x} - s_{\bar{x}}, \bar{x} + s_{\bar{x}})$ 内的概率约为 68.3%。

上面我们对系统误差和随机误差分别进行了讨论,在实际测量中系统误差和随机误差常常同时出现并且互相联系,有时难以严格划分系统误差和随机误差.例如,就环境温度变化引起的误差来说,在短时间内温度可以看成是恒定的,这时温度的影响造成的误差是系统误差.在较长的时间内温度实际是在某个平均值附近波动的,由此而产生的误差就成为随机误差.如米尺的刻度不准,如果每次都用该米尺的同一部位测量,误差就恒定;但如果用不同部位作多次测量,误差就具有统计规律.作为测量结果,最后必须要把系统误差和随机误差综合起来考虑,而系统误差和随机误差的合成是一个相当复杂的问题.1970年以来,对误差情况的定量估计,国际上逐步改用一个新概念——不确定度.不确定度是建立在误差理论基础上的一个概念,只有了解了误差理论的基本知识,才能正确理解不确定度.

【阅读材料】

假设测量中已经消除系统误差,只有随机误差.我们对同一物理量进行多次重复测量(等精度测量),会发现每次测量值不完全相同,这是因为存在不能控制的偶然因素使实验条件发生变化,比如观察者本身分辨本领的限制,使各个测量值之间出现差异,使测量值带有随机性,存在着不能预知的测量误差.另外有些物理现象本身具有随机性,如包含大量气体分子,处于平衡状态的气体体系,它的热力学量(压强、温度等),是大量气体分子热运动动能和分子对器壁碰撞的能量的平均效应,因此,热力学量的数值是一个统计平均值,这些物理量的

实际值,时刻围绕着平均值发生微小的变化。

既然测量存在随机性,待测物理量 X 是随机变量,就要用定量研究随机现象规律性的科学——概率论和数理统计学来分析研究,找出随机数据中隐含着自然规律。

随机变量 X 的 n 个随机数 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 的集合称为随机样本,随机变量取值的全体称为随机总体。要了解一个随机变量,不但要知道它的全部可能取值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$,还必须知道对应各个取值出现的可能性,即概率 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$,对于离散型随机变量可用概率分布函数 $p(x)$ 来描述它的概率分布。对于连续型随机变量,用概率密度函数 $f(x)$ 来描述它的概率分布。如果已知概率密度函数为 $f(x)$,就可以计算随机变量 X 的值落在某一区间 (a, b) 内的概率: $p = \int_a^b f(x) dx$ 。

对物理量 X 进行重复测量(等精度测量),测得的测量列为: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 。当测量次数 n 趋于 ∞ 时,物理量 X 将成为连续型随机变量,其分布可近似看作正态分布,正态分布的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_0}{\sigma_x}\right)^2\right] \quad (1.2.4)$$

随机变量的数字特征

1. 数学期望 $E(X)$ (均值、期待值)

数学期望 $E(X)$ 为随机变量各种可能取值与其对应的概率相乘后求和。对于正态分布,

$$E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x) dx = x_0 \quad (1.2.5)$$

随机变量的数学期望实际是它的各种可能取值的加权平均,权重系数为可能取值出现的概率,数学期望反映了随机变量的共性。

2. 总体方差 $D(X)$

随机变量 X 的取值 x 与数学期望 $E(X)$ 之差的平方的数学期望,称为总体方差 $D(X)$ 。

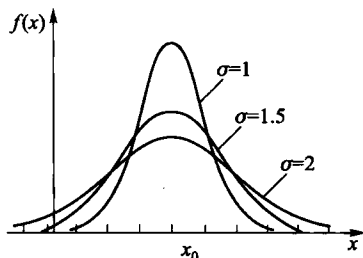
对于正态分布,

$$D(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x-x_0)^2 f(x) dx = \sigma_x^2 \quad (1.2.6)$$

随机变量的总体方差反映了随机变量各种可能取值的离散性。方差的算术平方根 $\sqrt{D(X)}$ 称为标准差或均方差,用 σ_x 表示。

从图 1-2-2 可见,正态分布概率密度函数具有单峰性,对称性。当 $x=x_0$ 时,出现峰值 $f(x_0)$ 。

$f(x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x}$, 可见 σ_x 直接反映了峰值 $f(x_0)$ 的大小, σ_x 越小,峰值 $f(x_0)$ 越大,分布曲线越陡,测量数据越集中,测量数据重复性越好。相反, σ_x 越大,峰值 $f(x_0)$ 越小,测量数据越分散,测量数据重复性越差。 σ_x 反映了测量数据的离散性。



误差 $\varepsilon = x - x_0$, 假设已经消除系统误差,则随机误差

图 1-2-2 正态分布概率密度函数