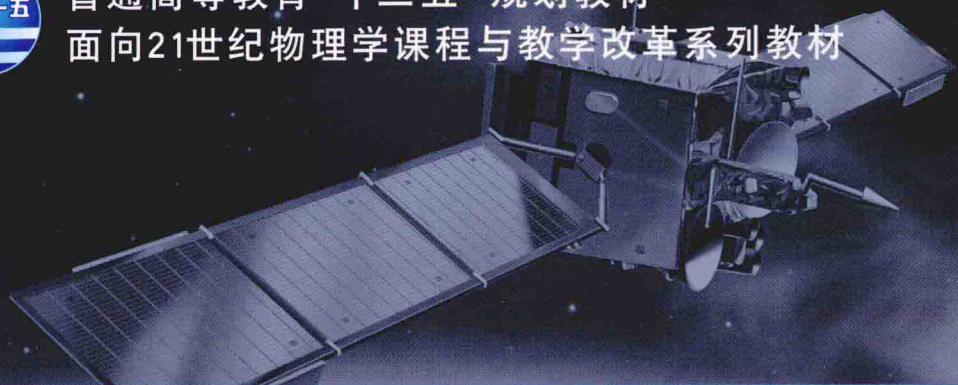


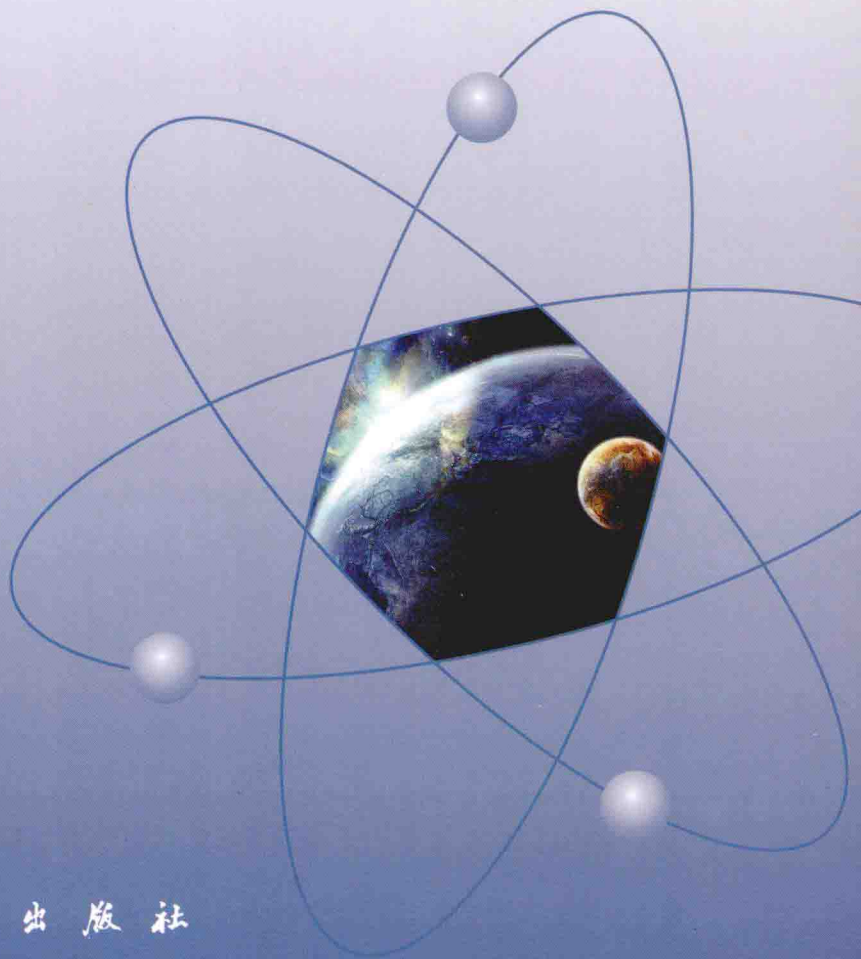


普通高等教育“十二五”规划教材
面向21世纪物理学课程与教学改革系列教材



大学物理实验

罗春霞 胡 波 主编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
面向 21 世纪物理学课程与教学改革系列教材

大学物理实验

罗春霞 胡 波 主编

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书是根据教育部非物理专业物理基础课程教学指导委员会最新制定的《理工科非物理专业大学物理课程教学基本要求(讨论稿)》编写而成的。书中包括了基本要求中的所有核心内容,涵盖测量、力学热学实验、电磁学实验、光学实验四部分,共 31 个实验。

本书可作为高等学校理工科非物理专业的教材,也可供文科及专科的相关专业选用及物理爱好者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/罗春霞,胡波主编. —北京:科学出版社,2014.1

普通高等教育“十二五”规划教材 面向 21 世纪物理学课程与教学改革系列教材

ISBN 978-7-03-039669-3

I. ①大… II. ①罗… ②胡… 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(2014)第 015219 号

责任编辑:吉正霞 蔡 莹 / 责任校对:董艳辉

责任印制:高 嵘 / 封面设计:苏 波

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>

武汉市新华印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本: B5(720×1000)

2014 年 1 月第 一 版 印张: 13 3/4

2014 年 1 月第一次印刷 字数: 268 000

定价: 27.50 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

大学物理实验是面向理工科各专业本科生的重要基础课之一,是大学生进入大学后最早接受的关于实验方法和实验技能的系统训练,它对人才培养有着不可替代的关键作用。通过关于本课程的学习,有利于培养学生观察、分析、发现 and 解决问题的能力,提升实验技能、科学思维和创新精神。

编写教材是教学工作的基本要素之一,而高质量的教材是提高教学质量的基本要素,使用合适的教材能够提高课堂的教学效果和质量。本教材是根据《理工科大学物理实验课程教学基本要求》,结合当前物理实验教学改革的实际编写而成的。本教材是以加强实践教学为宗旨,培养学生的实际动手能力和操作技能、引导学生的创新思维、理论联系实际为目的,针对不同专业,结合各专业特点,选取不同的实验,以便更好地加强专业基础的技能操作,充分显示学生的动手能力的优势。

本书内容包括误差和数据处理、力学、热学、电磁学和光学等 31 个实验项目。按照 36 学时的教学计划,并结合各专业的特点,每个学生可以选作 12 个实验。

本书由罗春霞和胡波任主编,陈冬梅、邵宝心和陈琼任副主编。此外,在编写过程中得到了胡绥萍、黄晓华、陈炳若、郭玉华等教师的支持,对本书的编写提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示由衷的感谢。

本书的编写,参考了一些院校的实验教材,在此向这些教材作者表示感谢。由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2013 年 10 月

目 录

前言

绪论	1
----	---

第一章 测量误差、不确定度及数据处理的基础知识	4
-------------------------	---

第一节 测量误差的基本知识	4
第二节 不确定度的基本概念	12
第三节 直接测量结果与不确定度的估算	14
第四节 间接测量结果与不确定度的估算	17
第五节 有效数字及其运算规则	21
第六节 实验数据处理的一般方法	26
习题	35

第二章 力学、热学实验	42
-------------	----

实验一 长度的测量及圆柱体标准偏差的计算	42
实验二 气垫导轨上的实验——速度和加速度的测量	49
实验三 弹簧振子的简谐振动	52
实验四 驻波法测声速	56
实验五 用动态法测定金属的杨氏模量	60
实验六 三线摆测物体的转动惯量	63
实验七 冷却法测量金属的比热容	67
实验八 热电偶温度计的标度	71
实验九 用拉脱法测液体的表面张力系数	75

第三章 电磁学实验	78
-----------	----

实验十 伏安法测晶体二极管特征	78
实验十一 直流电桥测电阻	81

实验十二	用补偿法测量电压、电流和电阻	85
实验十三	交流电路中功率和功率因数的测量	91
实验十四	RLC 串联电路的测量与分析	95
实验十五	霍尔效应	101
实验十六	电表改装与校准	108
实验十七	交流电桥	114
实验十八	交流电路的谐振	118
实验十九	示波器的原理及应用	125
实验二十	RLC 电路的稳态特性	133
实验二十一	静电场描绘	141
第四章	光学实验	145
实验二十二	薄透镜焦距的测定	145
实验二十三	分光计的调节和使用	150
实验二十四	等厚干涉现象与应用	159
实验二十五	迈克耳孙干涉仪	164
实验二十六	光的单缝衍射及光强分布的测定	171
实验二十七	衍射光栅测定光波波长	174
实验二十八	偏振光的获得与检验	178
实验二十九	超声光栅测定液体中的声速	183
实验三十	光电效应	188
实验三十一	全息照相	193
附录 A	基本常数表	199
附录 B	国际单位制简介	201
附录 C	常用物理量数据表	203

绪 论

物理学是一门实验科学。物理概念的建立和物理规律的发现都以严格的实验为基础,并且不断受到实验的检验。物理学研究的对象又是物质世界中最普遍、最基本的运动形式。因此,作为一门系统地进行实验技术训练的实验课——物理实验,有着丰富而广泛的内容,是高等学校学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,在培养学生的科学实验能力的全过程中,将起着重要的基础作用。

一、物理实验课的目的和任务

(1) 通过对实验现象的观察分析和对物理量的测量,使学生掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能;同时加深对基本物理概念和基本物理定律的认识和理解。

(2) 培养和提高学生的科学实验能力。要求学生通过阅读实验教材或参考资料,能够理解实验内容;借助教材和仪器说明书,正确调整和使用基本实验仪器;对实验现象和实验中遇到的问题,能够运用新学理论知识进行初步的分析、判断和解决;正确记录和处理实验数据,判断和分析实验结果,撰写合格的实验报告。

(3) 培养学生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,主动进取的探索精神,遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品德。

二、物理实验课的教学要求

物理实验课是独立的一门课,它是在教师的指导下,学生独立进行的学习过程。为了做好每次实验,达到实验课程教学的目的要求,实验课分为课前预习、课堂实验和书写实验报告三个基本环节。

1. 课前预习

由于课堂实验的时间有限,为了提高实验课质量,学生在进行课堂实验前必须认真阅读实验教材,明确本次实验的目的,了解实验原理和方法,弄清要测量哪些物理量,哪些物理量是直接测量量,哪些是间接测量量,用什么方法和仪器,在此基

础上写出预习报告。预习报告的内容包括实验目的、实验仪器、相关实验原理图及计算公式、主要实验步骤及实验注意事项,同时设计好实验数据表格。

2. 课堂实验

课堂实验是实验课的重要环节,学生进入实验室后应按下列要求进行实验。

(1) 认真听取教师对本实验的要求、重点、难点和注意事项的讲解;对照仪器,仔细阅读有关仪器的使用说明和操作注意事项(在熟悉以上内容之前不可随意摆弄实验设备)。

(2) 进行实验设备的安装与调整、电路连接。

(3) 按实验步骤进行实验,实验中要细心操作,注意观察。实验应独立完成,如有二人或多人合做一个实验时,应注意团队精神及分工合作,人人动手,不要一人包办代替。电磁学实验中,在连接电路前,应考虑仪器设备的合理摆放,电路连接好后,请教师检查,确定电路连接正确无误后方可接通电源进行实验。观察实验现象及数据应认真仔细,遇到问题时应冷静地分析和处理;仪器发生故障时,也要在教师指导下学习排除故障的方法。在实验中有意识地培养自己的独立工作能力。

(4) 做好实验记录。记录是实验的一个基本技能,记录必须清楚、真实、完整、正确。实验记录必须符合记录规范,不可以用铅笔做记录或随意涂改。不得抄袭或随意修改测量数据,如确实记错了,应轻轻地画上一道,在旁边写上正确值。一个好的实验结果必须是经过反复实验才能得到的,对于已经测量的实验数据应认真地进行自查。认为没有问题时,再将实验记录交教师审查,并由教师签名认可。在实验记录未获得教师审查认可前,切勿拆除实验装置。

三、物理实验守则

为了完成好物理实验课的任务,取得良好的学习效果,学生应认真遵守实验室规则:

(1) 上课时必须带来课前准备好的预习报告和数据记录表格,经教师检查后方可进行实验,否则不能参加该次试验。

(2) 因故不能做实验者,应向指导教师请假,无正当理由迟到 15 min 者扣分,超半小时者教师将取消其本次实验资格。

(3) 遵守课堂纪律,保持安静的实验环境。

(4) 使用电源时,须经教师检查线路并许可后,才能接通电源。

(5) 爱护仪器。实验中按仪器说明书使用,违反使用说明造成仪器损坏的应照价赔偿。

- (6) 实验报告应在实验一周内集体送交实验室。
- (7) 只有全部完成教学计划规定的所有项目,才能参加本课程期末考核。

四、书写实验报告

书写实验报告是对实验全过程的总结和深入理解的一个环节,应独立完成,要求字体工整,文理通顺,图表规矩,结论明确,逐步培养以书面形式分析总结科学实验结果的能力。内容包括:

- (1) 实验名称、实验者姓名、实验日期。
- (2) 实验目的。
- (3) 实验原理。对实验所依据的理论做简要叙述,并附有基本的公式和原理图(包括电路图或光路图)。
- (4) 实验仪器(标明仪器的型号和编号)。
- (5) 实验步骤(自己实际操作过程)。
- (6) 数据记录与处理。将原始数据转记于报告上(原始记录也应附在报告上,以便教师检查);对实验数据进行误差分析,求出实验结果。
- (7) 实验结果讨论。对实验中观察到的现象、误差来源、实验中存在的问题进行讨论与分析及回答实验思考题等。也可对实验本身的设计思想、实验仪器的改进等提出建设性意见。

第一章 测量误差、不确定度及数据处理的基础知识

物理实验离不开物理量的测量,由于测量仪器、测量方法、测量条件、测量人员等因素的限制,对一物理量的测量不可能是无限精确的,即测量中的误差是不可避免的。没有测量误差的基本知识,就不可能获得正确的测量值;不会计算测量结果的不确定度就不能正确表达和评价测量结果;不会处理数据或处理数据方法不当,就得不到正确的实验结果。由此可见,测量误差、不确定度与数据处理的基本知识在整个实验中占有非常重要的地位。本章从实验教学的角度出发,主要介绍误差和不确定度的基本概念、测量结果不确定度的计算,实验数据处理和实验结果表达等方面的基本知识。这些知识不仅在每个物理实验中要用到,而且对于今后从事科学实验也是必须了解和掌握的。由于这部分内容涉及面较广,深入的讨论需要有丰富的实践经验和较多的数学知识,因此不能指望通过一两次学习就完全掌握。我们要求实验者首先对提到的问题有一初步的了解,以后结合每一个具体实验再仔细阅读有关内容,通过实际运用逐步加以掌握。

误差分析、不确定度计算以及数据处理贯穿于实验的全过程,它表现在实验前的实验设计与论证,实验进行过程中的控制与监视,实验结束后的数据处理和结果分析。通过本章的学习和今后各个实验中的运用,要求达到:

- (1) 建立误差和不确定度的概念,正确估算不确定度,懂得如何正确完整地表示实验测量结果。
- (2) 掌握有效数字的概念及运算规则,了解有效数字与不确定度的关系。
- (3) 了解系统误差对测量结果的影响,学习发现某些系统误差、减小系统误差及削弱其影响的方法。
- (4) 掌握列表法、作图法、逐差法和回归法等常用的数据处理方法。

第一节 测量误差的基本知识

一、测量与误差

物理实验是将自然界物质运动中的物理形态按人们的意愿在实验中再现,找

出各物理量之间的关系,确定它们的数值大小,从中获得规律性的认识,或验证理论,或发现规律,或作为实际应用的依据。要得到这种定量化的认识,就必须进行测量。为确定被测对象的测量值,首先必须选定一个单位,然后用这个单位与被测对象进行比较,求出它对该单位的比值,这个比值即为数值。显然,数值的大小与所选用的单位有关。因此,表示一个被测对象的测量值时必须包括数值和单位。

1. 直接测量和间接测量

可以用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量称为直接测量,相应的物理量称为直接测量量。例如,用米尺测长度,用天平称质量,用电表测电流和电压等都是直接测量。

在实际测量中,许多物理量没有直接测量的仪器,往往需要根据某些原理得出函数关系式,由直接测量量通过数学运算才能获得测量结果。这种测量称为间接测量,相应的物理量称为间接测量量。例如,用单摆测某地重力加速度 g ,先直接测得摆长 l 和单摆周期 T ,然后由公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 算出重力加速度,因此 g 为间接测量量。

2. 等精度测量和不等精度测量

如对某一物理量进行多次重复测量,而且每次测量的条件都相同(同一测量者,同一组仪器,同一种实验方法,温度和湿度等环境也相同),那么我们就没有任何依据可以判断某一次测量一定比另一次更准确,所以每次测量的精度只能认为是具有同等级别的。我们把这样进行的重复测量称为等精度测量。在诸测量条件中,只要有一个发生了变化,这时所进行的测量,就称为不等精度测量。一般在进行多次重复测量时,要尽量保持为等精度测量。

3. 测量误差

在一定条件下,任何一个物理量的大小都是客观存在的,都有一个实实在在、不依人的意志为转移的客观量值,称为真值。在测量过程中,我们总希望准确地测得待测量的真值。但是,任何测量总是依据一定的理论和方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的人员进行的。由于实验理论的近似性、实验仪器的灵敏度和分辨能力的局限性,实验环境的不稳定性与人的实验技能和判断能力的影响等,使测量值与待测量的真值之间总存在着差异,我们把这种差异称为测量误差。若某物理量的测量值为 x ,真值为 A ,则测量误差定义为

$$\epsilon = x - A \quad (1-1-1)$$

上式所定义的测量误差反映了测量值偏离真值的大小和方向,因此又称 ϵ 为绝对误差。一般来说,真值仅是一个理想的概念,只有通过完善的测量才能获得。但是

严格的完善测量难以做到,故真值就不能确定。实际测量中,一般只能根据测量值确定测量的最佳值。通常取多次重复测量的平均值作为最佳值。

绝对误差可以表示某一测量结果的优劣,但在比较不同测量结果时则不适用,需要用相对误差表示。例如,测量 10 m 长相差 1 mm 与测量 1 m 长相差 1 mm,两者绝对误差相同,而相对误差不同。相对误差定义为

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量最佳值}} \times 100\% \quad (1-1-2)$$

有时被测量有公认值或理论值,还可用“百分误差”来表征

$$\text{百分误差} = \frac{\text{测量最佳值} - \text{公认值}}{\text{公认值}} \times 100\% \quad (1-1-3)$$

误差存在于一切科学实验和测量过程的始终。在实验的设计、仪器本身的精度、环境条件以及实验数据处理中都可能存在误差,因此分析测量中可能产生的各种误差,尽可能消除其影响,并对最后结果中未能消除的误差做出估计,就是物理实验和许多科学实验中不可缺少的工作。为此,必须进一步研究误差的性质和来源。

二、误差的分类

误差按其性质和产生原因可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

1. 系统误差

在一定条件下,对同一物理量进行多次重复测量时,误差的大小和符号均保持不变;而当条件改变时,误差按某种确定的规律变化(如递增、递减、周期性变化等),则这类误差称为系统误差。

1) 系统误差的来源

(1) 仪器的结构和标准不完善或使用不当引起的误差。如天平不等臂、分光计读数装置的偏心差、电表的示值与实际值不符等属于仪器缺陷,在使用时可采用适当测量方法加以消除。仪器设备安装调整不妥,不满足规定的使用状态,如不水平、不垂直、偏心、零点不准等使用不当的情况应尽量避免。

(2) 理论或方法误差。它是由测量所依据的理论公式近似或实验条件达不到理论公式所规定的要求等引起的。如单摆测重力加速度时所用公式的近似性;伏安法测电阻时,不考虑电表内阻的影响等。

(3) 环境误差。它是由于外部环境如温度、湿度、光照等与仪器要求的环境条件不一致而引起的误差。

(4) 实验人员的生理或心理特点所造成的误差。如用停表计时时,总是超前

或滞后;对仪表读数时总是偏一斜视等。

2) 系统误差的分类

系统误差按对其掌握程度可分为已定系统误差和未定系统误差。

(1) 已定系统误差。在一定的条件下,采用一定的方法,对误差取值的变化规律及其大小和符号都确切掌握的系统误差。一经发现,在测量结果中可以修正,如螺旋测微器的零点修正。

(2) 未定系统误差。指不确切掌握误差取值的变化规律及其大小和符号,而仅知最大误差范围(或极限误差)的系统误差。例如,仪表的基本允许误差主要属于未定系统误差。

系统误差按其表现的规律可分为定值系统误差和变值系统误差。

(1) 定值系统误差。这种误差在测量过程中其大小和符号恒定不变。例如,螺旋测微器没有零点修正,天平砝码的标称值不准确等。

(2) 变值系统误差。这种误差在测量过程中呈现规律性变化。这种变化,有的可能随时间而变,有的可能随位置变化。例如,分光计刻盘中心与望远镜转轴中心不重合,存在偏心差所造成的读数误差就是一种周期性变化的系统误差。

系统误差产生的原因往往可知或能掌握,一经查明就应设法消除其影响。对未能消除的系统误差,若它的符号和大小是确定的,则可对测量值加以修正;若它的符号和大小都是不确定的,则可设法减小其影响并估计出误差范围。

2. 随机误差

在测量过程中,即使系统误差消除以后,在相同条件下重复测量同一物理量时,仍然不会得到完全相同的结果,其测量值分散在一定的范围内,所得误差时正时负,绝对值时大时小,既不能预测,也无法控制,呈现无规则的起伏。这类误差称为随机误差。

随机误差的产生,一方面是由测量过程中一些随机的未能控制的可变因素或不确定的因素引起的。如人的感官灵敏度以及仪器精密度的限制,使平衡点确定不准或估读数有起伏;由于周围环境干扰而导致读数的微小变化,以及随测量而来的其他不可预测的随机因素的影响等。另一方面是由被测对象本身的不稳定性引起的。如加工零件或被测样品本身存在的微小差异,这时被测量量就没有明确的定义值,这也是引起随机误差的一个原因。

随机误差就个体而言是不确定的,但其总体(大量个体的总和)服从一定的统计规律,因此可以用统计方法估算其对测量结果的影响。

3. 粗大误差

明显地歪曲了测量结果的误差称为粗大误差。它是由于实验者使用仪器的方

法不正确,粗心大意读错、记错、算错测量数据或实验条件突变等原因造成的。含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值,正确的结果中不应包含有过失错误。在实验测量中要极力避免过失错误,在数据处理中要尽量剔除坏值。

三、随机误差的分布规律与特性

随机误差的出现,就某一测量值来说是没有规律的,其大小和方向都是不能预知的,但对同一物理量进行多次重复测量时,则发现随机误差的出现服从某种统计规律。

随机误差的分布有多种,不同的分布有不同形式的分布函数,但无论哪一种分布形式,一般都有两个重要的参数,即平均值和标准偏差。

1. 正态分布规律

理论和实践都证明,大多数随机误差服从正态分布(高斯分布)规律。下面简要讨论正态分布的特点及特性参量。

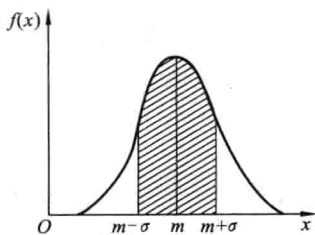


图 1-1-1

标准化的正态分布曲线如图 1-1-1 所示。图中横坐标 x 表示某一物理量的测量值,纵坐标表示测量值的概率密度 $f(x)$:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-(x-m)^2/\sigma^2}$$

式中, $m = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$, m 称为总体平均值;

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n}}$$

σ 称为正态分布的标准偏差,是表征测量分散性的一个重要参量。

从曲线上看,曲线峰值处的横坐标相应于测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时的测量平均值,即总体平均值 m ,横坐标上任一点 x_i 到 m 的距离 $(x_i - m)$ 即为测量值 x_i 的随机误差分量。标准偏差 σ 为曲线上拐点处的横坐标与 m 值之差。这条曲线是概率密度分布曲线。曲线与 x 轴间的面积为 1,可以用来表示随机误差在一定范围内的概率。如图 1-1-1 中阴影部分的面积就是随机误差在 $\pm \sigma$ 范围内的概率,即测量值落在 $(m - \sigma, m + \sigma)$ 区间内的概率 p 由定积分计算得出,其值为 $p = 68.3\%$ 。如将区间扩大到 2 倍,则 x 落在 $(m - 2\sigma, m + 2\sigma)$ 区间中的概率为 95.4% ; x 落在

$(m-3\sigma, m+3\sigma)$ 区间中的概率为 99.7%。

服从正态分布的随机误差有如下特征：

- (1) 单峰性。绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。
- (2) 对称性。绝对值相等的正误差和负误差出现的几率相等。
- (3) 有界性。绝对值很大的误差出现的概率近于零。
- (4) 抵偿性。随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋近于零。

2. 残差、偏差和误差

图 1-1-2 随机误差分布曲线中, x_0 是被测量的真值, m 是总体平均值, $\bar{x}$ 是有限次测量的平均值, x_i 是单次测得值。

残差: 单次测得值 x_i 与测量平均值 $\bar{x}$ 之差。即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

偏差: 单次测得值 x_i 与总体平均值 m 之差, 偏差就是随机误差(分量)。当系统误差为零时, 偏差才是误差。

误差: 单次测得值 x_i 与被测量真值 x_0 之差。

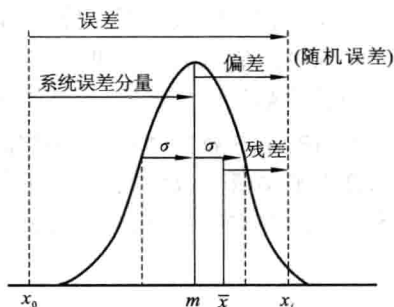


图 1-1-2

3. σ 、 S 和 S_x

1) 总体标准偏差 σ

不考虑系统误差分量时, σ 称为标准误差。 σ 不是测量值中任意一个具体测量值的随机误差。 σ 的大小只说明在一定条件下等精度测量列随机误差的概率分布情况。在该条件下, 任一单次测量值的随机误差, 一般都不等于 σ , 但却认为这一系列测量中所有测量值都属于同一个标准偏差 σ 的概率分布。在不同条件下, 对同一被测量量进行两个系列的等精度测量, 其标准偏差 σ 也不相同。我们已经知道:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n}} \quad (1-1-4)$$

式中, m 为 $n \rightarrow \infty$ 时的总体平均值。不考虑系统误差分量时, 它就是真值。由于实验中不可能出现 $n \rightarrow \infty$, 故 m 是一个理想值。因此 σ 也是一个理论值。所谓置信概率 p 为 68.3% 也是一个理论值。

2) 有限次测量时, 单次测得值的标准差 S (或 S_x)

由于实验中测量次数总是有限的, 在大学物理实验中, 通常取 $5 \leq n \leq 10$, 因此我们实际应用的都是这些情况下的单次测得值的标准偏差公式, 即贝塞尔公式:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-1-5)$$

S 是从有限次测量中计算出来的总体标准偏差 σ 的最佳估计值, 称为实验标准偏差。它表征对同一被测量作 n 次有限测量时, 其结果的分散程度。其相应的置信概率接近于 68.3%, 但不等于 68.3%。

3) 算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差 $S_{\bar{x}}$

如果在相同条件下, 对同一量做多组重复的系列测量, 则每一系列测量都有一个算术平均值。由于随机误差的存在, 两个测量列地算术平均值也不相同。它们围绕着被测量量的真值(设系统误差分量为零)有一定的分散。此分散说明了算术平均值的不可靠性, 而算术平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 则是表征同一被测量的各个测量列算术平均值分散性的参数, 可作为算术平均值不可靠性的评定标准。 $S_{\bar{x}}$ 又称算术平均值的实验标准差。可以证明:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-1-6)$$

我们可以这样来理解它: 由于算术平均值已经对单次测量的随机误差有一定的抵消, 因而这些平均值就更接近真值, 它们的随机误差分布离散就会小得多, 所以平均值的标准偏差要比单次测量值的标准偏差小得多。

四、系统误差的处理

在许多情况下, 系统误差常常不明显地表现出来, 然而它却是影响测量结果精确度的主要因素, 有些系统误差会给实验结果带来严重影响。因此, 发现系统误差, 设法修正、减小或消除它的影响, 是误差分析的一个很重要的内容。由于系统误差的处理涉及较深的知识, 这里只做简要介绍。

1. 发现系统误差的方法

1) 数据分析法

当随机误差比较小时, 将待测量的绝对误差按测量次序排列, 观察其变化。若绝对误差不是随机变化而呈规律性变化, 如线性增大或减小、周期性变化等, 则测量中一定存在系统误差。

2) 理论分析法

分析实验依据的理论公式所要求的条件在实验测量过程中是否得到满足。例如气垫导轨实验中,滑块在导轨上的运动因受到周围空气及气垫层的粘滞性摩擦阻力的作用会引起速度减小。如果实验中作为无摩擦的理想情况来处理,就会产生与摩擦力有关的系统误差。

分析仪器要求的使用条件是否得到满足。实验不满足仪器的使用条件时也会产生系统误差。

3) 对比法

这种方法适合固定的系统误差。

(1) 实验方法对比。用不同方法测量同一物理量,在随机误差允许的范围内观察结果是否一致。如不一致,则其中某种方法存在系统误差。

(2) 仪器对比。例如用两个电表接入同一电路,对比两个表的读数,如果其中一个为标准表,就可得出另一个表的修正值。

(3) 改变测量条件进行对比。例如电流正向与电流反向读数;在增加砝码过程与减少砝码过程中读数,观察结果是否一致。

2. 系统误差的消除与修正

任何实验仪器、理论模型、实验条件,都不可能理想到不产生系统误差的程度。对于系统误差,一是进行修正,二是消除其影响。

1) 消除产生系统误差的根源

如果能够找到产生系统误差的根源,无论是理论模型,实验仪器还是实验条件,我们都可以使其更完善,从而减小系统误差的影响。

2) 用修正值对测量结果进行修正

用标准仪器对测量仪器进行校准,找出修正值或校准曲线,对结果进行修正。对由理论公式的近似造成的误差,找出修正值进行修正。

3) 选择适当的测量方法,减小和消除系统误差

(1) 交换法。在测量过程中对某些条件(如被测物的位置)进行交换,使产生系统误差的原因对测量结果起相反的作用。例如为了消除天平不等臂而产生的系统误差,可将被测物作交换测量。

(2) 替换法。保持测量条件不变,选择一个大小适当的已知量(通常是可调的标准量)替代被测量而不引起测量仪器示值的改变,则被测未知量就等于这个已知量。由于在替代的两次测量中,测量仪器的状态和示值都相同,从而消除了测量过程带来的系统误差。

(3) 抵消法。改变测量中的某些条件进行两次测量,使两次测量中误差的大小相等、符号相反,取其平均值作为测量结果以消除系统误差。