

21世纪应用型本科院校规划教材

物理实验

主 编 金雪尘 王 刚 李恒梅



南京大学出版社

21世纪应用型本科院校规划教材

物理实验

主 编 金雪尘 王 刚 李恒梅
副主编 杨景景 万志龙 黄红云
参 编 周亚亭 朱 红 王 震 黄 亮



南京大学出版社

内容提要

本书以高等学校物理学与天文学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会《理工科大学物理实验课程教学基本要求》为依据,以提高应用型本科高校物理实验教学质量为目标,结合近年来物理实验教学的发展趋势编写而成。本书在重视打好实验基础的同时,将现代技术运用于物理实验,如数字化测量、传感器的应用和数字存储示波器等。全书分六章,前两章为实验理论,包括误差理论与数据处理基本知识、不确定度概述、物理实验基本方法和基本技术;后四章为实验内容部分,分别为基础实验、综合性实验、设计性实验和计算机在物理实验中的应用。本书内容全面,重点突出,便于自学。

本书可作为理工科高校不同专业物理实验教学用书,也可作为相关专业人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

物理实验 / 金雪尘, 王刚, 李恒梅主编. — 南京 :
南京大学出版社, 2017. 1

21 世纪应用型本科院校规划教材

ISBN 978 - 7 - 305 - 18139 - 9

I. ①物… II. ①金… ②王… ③李… 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(2016)第 315652 号

出版发行 南京大学出版社

社 址 南京市汉口路 22 号

邮 编 210093

出 版 人 金鑫荣

丛 书 名 21 世纪应用型本科院校规划教材

书 名 物理实验

主 编 金雪尘 王 刚 李恒梅

责任编辑 胥橙庭 单 宁

编辑热线 025 - 83596923

照 排 南京南琳图文制作有限公司

印 刷 宜兴市盛世文化印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 17 字数 388 千

版 次 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 305 - 18139 - 9

定 价 38.00 元

网址: <http://www.njupco.com>

官方微博: <http://weibo.com/njupco>

官方微信号: njupress

销售咨询热线: (025) 83594756

* 版权所有,侵权必究

* 凡购买南大版图书,如有印装质量问题,请与所购
图书销售部门联系调换

前 言

物理实验是理工科大学生进入大学后第一门进行科学实验基本训练的必修课程,在培养学生的实验方法和实验技能等方面有着不可替代的作用。作为应用型本科院校的物理实验教学工作者,深感培养学生实践动手能力的重要作用,在科学技术迅猛发展的大背景下,我们不断学习和借鉴物理实验教学经验,思考和探索物理实验改革内容。本书是在结合多年教学改革经验的基础上,参考教育部物理基础课教学指导委员会《理工科大学物理实验课程教学基本要求》和《高等学校基础课实验教学示范中心建设标准》编写而成。

本教材的实验选题覆盖面广、有代表性,在编写时注意了以下几点:

一、由于现代科学技术的成果不断渗透到生产、生活实践中,教材在保证大学物理实验体系完整的基础上,尽量将现代科技成果运用于物理实验中,如传感器的应用、电子天平、数字式电表、电子计时器等。

二、鉴于学生的物理实验基础参差不齐,在编排实验内容时,分成基础实验、综合性实验、设计性实验等几个部分,各部分内容要求不同,可供不同的班组或专业选用;在每个实验的内容上,尽量用较少的篇幅讲清实验原理和实验方法,对于一些较为复杂的数学推导过程,一般放在每个实验后的附录中,在实验原理部分仅给出结论或公式,易于学生对每个实验的把握和理解。

三、在设计性实验部分,为了尽可能地发挥学生主观能动性,在编写时只提出实验要求和实验器材,并根据不同的实验要求给出一些实验提示,旨在培养学生自主设计实验和独立解决问题的能力。这些实验一部分可在正常教学计划时间内完成,另一部分可在课外专题实验时间完成。

本书由金雪尘、王刚、李恒梅担任主编,杨景景、万志龙、黄红云担任副主编,参加编写的还有周亚亭、朱红、王震、黄亮。在编写过程中,得到常州工学院教务处、数理与化工学院领导和全体物理实验任课教师、实验技术人员的大力支持,张德生、茅锐、祁少明等同志协助做了大量工作,在此深表感谢。

本书可作为理工科院校和职业技术学院的大学物理实验教材或参考书。

限于编者的能力和水平,不妥和疏漏之处在所难免,恳请广大师生批评指正。

编 者

2016年11月

目 录

前 言	1
绪 论	1
第一节 物理实验课的地位和作用	1
第二节 物理实验基本要求和基本程序	2
第一章 测量与误差	4
第一节 测量与误差	4
第二节 测量结果的不确定度评定	9
第三节 有效数字及其运算	13
第四节 实验数据处理的基本方法	15
第二章 物理实验基本方法和基本技术	22
第一节 物理实验基本测量方法	22
第二节 电磁学实验基本仪器及实验操作规程	25
第三节 光学实验基本仪器及实验操作规程	35
第三章 基础实验	42
实验 3.1 物体密度的测定	42
实验方法指导之一——关于有效数字	48
实验 3.2 刚体转动惯量的实验研究	49
实验方法指导之二——几种减小误差的测量方法	55
实验 3.3 气轨上测物体的速度和加速度	56
实验 3.4 验证动量守恒定律和机械能守恒定律	59
实验 3.5 液体表面张力系数的测定	63
实验 3.6 落球法测量液体的黏滞系数	71
实验 3.7 示波器的使用	75

实验 3.8 电桥法测电阻(单臂电桥、双臂电桥)	84
实验方法指导之三——电路故障的排除	91
实验 3.9 电表的改装与校正	92
实验 3.10 静电场的模拟与描绘	97
实验 3.11 交变磁场的测量——亥姆霍兹线圈的使用	100
实验 3.12 电位差计测电动势	105
实验 3.13 透镜焦距的测定	113
实验 3.14 光的干涉——牛顿环、劈尖	117
实验 3.15 分光计的调整、棱镜折射率的测定	123
第四章 综合性实验	135
实验 4.1 拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量	135
实验 4.2 声速测定	140
实验 4.3 用霍尔元件测螺线管磁场	144
实验 4.4 电子束的电偏转研究	150
实验 4.5 电子束的磁偏转研究	155
实验 4.6 铁磁材料动态磁滞回线的测试	159
实验 4.7 光栅光谱和光栅常数的测定	163
实验 4.8 迈克耳逊干涉仪的调整和使用	167
实验 4.9 光电效应及普朗克常数测定	173
实验 4.10 夫兰克-赫兹实验	177
实验 4.11 音频信号光纤传输技术实验	182
实验 4.12 动态法测量杨氏模量	186
实验 4.13 光的偏振	191
实验 4.14 密立根油滴实验	197
实验 4.15 数字存储示波器的使用	204
实验 4.16 用波耳共振仪研究受迫振动	212
实验 4.17 用旋光仪测量溶液的旋光率及其浓度	220
实验 4.18 RC 电路的暂态过程	223
第五章 设计性实验	229
第一节 实验设计基础知识	229

第二节 设计性实验项目	231
实验 5.1 重力加速度的测定	231
实验 5.2 非线性电阻伏安特性的研究	232
实验 5.3 显微镜和望远镜的设计与组装	234
实验 5.4 自搭迈克耳逊干涉仪	238
实验 5.5 温度的测量与报警	240
实验 5.6 助听器的设计与制作	241
实验 5.7 红外防盗报警器的设计与制作	242
实验 5.8 水位自动控制系统的设计	243
第六章 计算机在物理实验中的应用	245
第一节 实验数据的采集处理和过程控制	245
第二节 实验数据的处理	246
第三节 物理实验的模拟和仿真	249
附 录	253
一、基本物理常数	253
二、法定计量单位	253
三、物理实验常数	256
参考文献	263

绪 论

第一节 物理实验课的地位和作用

物理学是所有自然科学的基础学科,其基本原理和基本方法在所有的自然科学中普遍适用。同时,它又为现代科学技术文明奠定了基础,无论是工业、农业、国防和医学,无论是一般技术还是高新技术,物理思想和物理方法都在其中起着十分重要的作用。纵观近代文明史,物理学的每一次重大突破,都对社会生产力的发展起了决定性的影响,对人类文明的进步做出了不可估量的贡献。其典型例子:一是以热力学为基础,以蒸气机为代表的第一次工业革命;二是以电磁场理论为基础,以电气化为代表的第二次工业革命;三是自 30 世纪以来物理学的一系列重大发现,更是将世界带进了计算机、核能、激光、航天等高新技术的时代。

物理学是一门实验科学,物理现象的研究和物理规律的探索都是以严密的实验事实为基础,并且不断受到实验的检验。物理学史上的重大突破,大多以物理实验作为基础,物理实验在自然科学和技术中同样具有基础性和普遍性。物理实验作为理工科大学生进入大学后的一门独立开设的实验课程,它不仅可以加深对物理理论知识的理解,更重要的是让学生获得基本的实验知识,在实验方法和技能诸方面得到较为系统、严格的训练。同时,它又可以为后续课程打好必要的实验基础。

作为应用型本科院校,学生在学好理论知识的同时,培养他们运用所学的知识解决实际问题的能力、提高学生科学实验的素质就显得尤为重要,通过物理实验课程的学习,要求同学完成下列几方面的任务:

(1) 通过对实验现象的观察分析及对物理量的测量,进一步掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。

通过有关长度测量实验的训练,要求同学掌握各种长度测量仪器(如游标尺、千分尺、读数显微镜、干涉仪等)的原理、用途和使用方法;通过电磁学实验的学习,要求掌握各种常用电学仪器、仪表(如电压表、电流表、示波器等)的原理和使用方法;通过一系列基本实验的训练,掌握一些常用实验技术,如仪器的调试技术(粗调、微调、调零、定标等)、电学元器件的识别技术、电路故障排除及安全用电技术等,并能运用物理实验的方法研究物理现象和物理规律。

(2) 培养学生从事科学实验的素质。

在物理实验的学习过程中,我们强调手脑并用,这就意味着动手要在动脑的高度支配下才能正确地完成实验目标。在实验过程中,不仅要有科学、严谨的逻辑思维,而且要有开放的形象思维、发散思维和联想思维,这样才能保证思维的活力,逐步培养创新意识和创造能力。

在物理实验的学习中应注意科学分析方法和测量方法的掌握和积累,例如物理实验中要学会根据基本实验条件和实验仪器进行实验结果的数量级的分析与判断,要学习基本物理实验方法,如比较法、替代法、放大法、转换法和模拟法等。

(3) 培养一定的科学实验的能力。

自学能力——能够自行阅读实验教材或参考资料,正确理解实验内容,在实验前做好相关的准备工作。

动手能力——能够借助教材和仪器,正确调整和使用常用仪器。

思维判断能力——能够运用物理学理论,对实验现象进行初步的分析和判断。

表达能力——能够正确记录和处理实验数据,绘制曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告。

初步设计能力——能够根据实验课题要求,确定实验方法,选择合理的仪器,拟定具体的实验程序。

(4) 养成实事求是的科学作风,严肃认真的科学态度,不怕困难、主动进取的探索精神;遵守操作规程,爱护公共财物的优良品德;实验过程中同学间相互协作、共同探索的合作精神。

第二节 物理实验基本要求和基本程序

一、预习

预习是上好实验课的基础和前提。预习的基本要求是仔细阅读教材,了解实验的目的和要求,知道实验原理、实验方法和所用实验设备。通过预习,学生应对所做的实验有一个初步的了解,写好预习报告(包括实验目的、原理、步骤、电路或光路图及数据表格等)。

二、实验操作与记录

实验室与教室的最大区别就是实验室中有大量的仪器设备和实验材料。在不同的实验室中,还分别有各种电源、激光器、易燃易爆物品和有害物品等。因此,进入实验室前必须详细了解并严格遵守实验室的各项规章制度。这些规章制度是为保护人身安全和仪器设备安全而规定的,违反了就可能酿成事故,必须首先牢记。

实验时,要胆大心细、严肃认真、一丝不苟。对于精密贵重的仪器或元件,特别要稳拿妥放,防止损坏。在电学实验中,连接好电路以后须经教师检查无误后方可通电。在实验过程中,不管使用的是高压电还是低压电,要养成人的身体不接触带电部位的良好习惯。在光学实验中,手拿光学元件时特别要注意手不接触元件的光学表面。

在使用任何仪器前,必须先看相关说明书,了解仪器的正确使用方法;在调节仪器时,应先粗调后细调;在读数时,应先取大量程后取小量程;实验完成后,应整理好仪器设备,关好水电,经教师许可后方可离开实验室。

实验记录是做实验的重要组成部分,它应全面真实反映实验的全过程,包括实验条件和情况以及实验中观察到的现象和测量到的数据。不仅要记录与预想一致的数据和现象,更要记录与预想不一致的数据和现象。记录应尽量清晰、详尽,实验数据需经教师签字认可。

在实验过程中要养成良好的心态,实验过程不会总是一帆风顺的,在遇到问题时,应看成是学习的良机,通过冷静的分析和处理,能使自己的实验能力得到较大提高。在仪器发生故障时,要在老师的指导下学习排除故障的方法。

三、完成实验报告

实验报告可以在预习报告的基础上继续写,也可以重新写一份。

写实验报告是培养实验研究人才的重要一环。在实验报告中,要求详细记录实验条件、实验仪器、实验环境、实验现象和测量数据。实验报告要尽量用自己的语言,不要照搬照抄,内容应以别人能看懂、自己若干年后也能看懂为标准。

实验报告主要有以下几部分的内容:

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验原理:包括基本公式及其推导过程,相关的电路图、光路图和实验示意图等,必要的文字说明。书写实验原理时,不应照抄实验指导书,要根据自己的理解,对本实验的原理做出概述。

(4) 仪器设备:包括仪器的型号、规格等。

(5) 实验步骤:简要地写出实验的整个过程。

(6) 实验数据及处理:详细列出实验数据表格、计算公式及计算的主要过程、不确定度的计算、必要的实验图表等。

(7) 实验结果:实验结果和结论的正确表述。

(8) 问题讨论:包括实验现象的分析、实验方法的改进与建议、实验的心得体会与收获、解答实验思考题。

第一章 测量与误差

第一节 测量与误差

一、测量

所谓测量,就是借助一定的实验工具,通过一定的实验方法,将待测量与选作计量单位的同类物理量进行比较,以确定被测量的量值为目的的一组操作。简而言之,测量就是为被测对象确定量值而进行的操作。

测量可分为直接测量和间接测量两种。

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。例如用米尺测长度、用温度计测温度、用秒表测时间等都是直接测量,所得的物理量如长度、温度、时间等称为直接测量量。

有些物理量无法进行直接测量,而需由若干个直接测量量经过一定的函数关系求出,这样的测量称为间接测量。大多数的物理量都是间接测量量。例如,要测铁圆柱体的密度 ρ 时,先测出其质量 m 、直径 d 和高度 h ,再根据公式 $\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}$ 计算出铁的密度 ρ ,这就是间接测量,而 ρ 就是间接测量量。

二、误差

1. 真值与误差

任何一个物理量,在一定条件下,都具有确定的量值,这是客观存在的,这个客观存在的量值称为该物理量的真值。测量的目的就是要力图得到被测量的真值。由于测量仪器、测量方法、测量条件、测量者的观察力等都不能做到绝对严密,测量值与真值不可能完全相同,我们把测量值与真值之差称为误差。设被测量的真值为 x_0 ,测量值为 x ,则绝对误差

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-1-1)$$

相对误差

$$E_r = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-1-2)$$

2. 最佳值与残差

实际测量中,为了减小误差,常常对某一物理量进行多次测量,得到一系列测量值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 测量结果的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-1-3)$$

算术平均值并非真值,但它比任何一次测量值的可靠性都要高。当测量次数 n 无限增多时,算术平均值 $\bar{x}$ 可作为接近真值的最佳值,称为近真值。我们把测量值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 之差称为该次测量的残差,以 v_i 表示,即

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-1-4)$$

三、误差的分类

正常测量的误差,按其产生的原因和性质可以分为系统误差和随机误差两类,它们对测量结果的影响不同,对这两类误差处理的方法也不同。

1. 系统误差

在同样条件下,对同一物理量进行多次测量,其误差的大小和符号保持不变,在测量条件改变时,其误差的大小和符号按一定规律变化,这类误差称为系统误差。系统误差具有确定性、规律性和可修正性,它主要来源于下列几方面:

(1) 仪器因素。由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用而造成的误差。例如,仪器标尺的刻度不准确、零点没有调准、等臂天平的臂长不等、砝码不准等。

(2) 理论或条件因素。由于测量所依据的理论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而引起的误差。例如,称物体质量时没有考虑空气浮力的影响、用伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响等等。

(3) 人员的因素。由于实验者的主观因素和操作技术而引起的误差。例如,使用停表计时,有的人总是操之过急,计时比真值短;有的人则反应迟缓,计时总是比真值长。再如,有的人习惯于侧坐斜视读数,致使读数偏大或偏小。

对实验者来说,系统误差的规律及其产生的原因,可能知道,也可能不知道。已被确切掌握其大小和符号的系统误差称为可定系统误差,对于大小和符号不能确切掌握的系统误差称为未定系统误差,前者一般可以在测量过程中采取措施予以消除,或在测量结果中进行修正,而后者一般难以修正,只能估计其取值范围。

2. 随机误差

在相同条件下,多次测量同一物理量时,即使排除了系统误差的影响,也会发现每次测量的结果都不一样,测量误差时大时小、时正时负,完全是随机的。在测量次数少时,显得毫无规律,但当测量次数足够多时,可以发现误差的大小和正负都服从某种统计规律。这种误差称为随机误差。随机误差的特征是单个具有随机性,而总体服从统计规律。它的这种特点使我们能够在确定条件下,通过多次重复测量来发现它,而且可以从相应的统计分布规律来讨论它对测量结果的影响。

3. 过失误差

过失误差是由于实验者不正确地使用仪器或粗心大意观察错误、记错数据而造成的。

过失误差又称为粗大误差。它实际上是一种测量错误,相应的数据应当予以剔除。

四、误差的处理

1. 系统误差的处理

(1) 系统误差的发现

系统误差一般难以发现,并且不能通过多次测量来消除,我们应从系统误差的来源着手分析。

理论分析法:分析实验所依据的理论和实验方法是否有不完善的地方;检查理论公式所要求的条件是否得到了满足;仪器是否存在缺陷;实验环境是否能使仪器正常工作等。

实验对比法:对同一测量可以采用不同的实验方法,使用不同的实验仪器,以及由不同的测量人员进行测量、对比、研究测量值变化的情况,可以发现系统误差的存在。

数据分析法:因为随机误差是遵从统计分布规律的,所以若测量结果不服从统计规律,则说明存在系统误差。我们可将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是呈规律变化,如线性增大或减小,则测量中一定存在系统误差。

(2) 系统误差的减小和修正

① 减小或消除产生系统误差的根源。如采用更符合实际的理论公式,满足仪器的正常使用条件,保持仪器及装置处于良好的状态等。

② 利用实验技巧,改进测量方法。

③ 通过理论公式引入修正值。

2. 随机误差的处理

(1) 标准偏差

在相同条件下,对某一物理量进行多次测量称为等精度测量。测量列就是等精度测量所得到的一组数值。由于随机误差的存在,各测量值有所不同,标准偏差是对这一组测量数据可靠性的一种评价。

当测量次数无限增多时,各测量值 x_i 的误差平方的平均值的平方根,称为标准偏差,也称为标准差,以 σ 表示,即

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2} \quad n \rightarrow \infty \quad (1-1-5)$$

式中 n 为测量次数。

σ 并不是一个具体的测量误差,它反映在相同条件下进行一组测量后,随机误差概率的分布情况,只具有统计性质的意义,是一个统计性的特征值。

(2) 随机误差的统计规律

大量的实验事实和统计理论都证明,大多数情况下,随机误差服从正态分布规律,误差的正态分布如图 1-1-1 所示。横坐标为误差 Δx ,

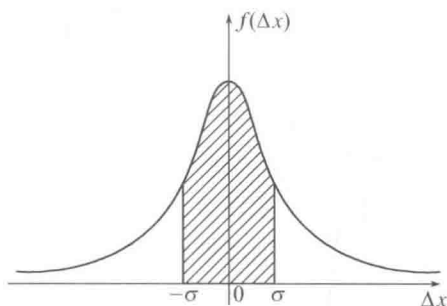


图 1-1-1 正态分布曲线

纵坐标为误差出现的概率密度函数 $f(\Delta x)$, $f(\Delta x)$ 的含义是在 Δx 附近, 单位误差间隔内该误差出现的概率, 其数学表达式为

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-1-6)$$

正态分布曲线具有以下性质:

- ① 单峰性: 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。
- ② 对称性: 绝对值相同的正负误差出现的概率相同。
- ③ 有界性: 在一定的测量条件下, 误差的绝对值不超过一定的限度。
- ④ 抵偿性: 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而减小, 最后趋于零。

由概率论可知, 随机误差落在 $(\Delta x, \Delta x + dx)$ 区间内的概率为 $f(\Delta x) dx$, 测量数据出现在某一区间的概率可以由正态分布函数在该区间的积分求得, 这个概率称为置信概率, 所对应的区间称为置信区间。若置信区间为 $[-\infty, +\infty]$, 则

$$p = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta x) dx = 1 \quad (1-1-7a)$$

式(1-1-7a)表明, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 任何一次测量误差落在 $[-\infty, +\infty]$ 置信区间的概率为 1, 满足归一化条件; 若置信区间为 $[-\sigma, +\sigma]$, 则

$$p(\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\Delta x) dx = 0.683 \quad (1-1-7b)$$

式(1-1-7b)表明, 任何一次测量误差落在 $[-\sigma, +\sigma]$ 置信区间的概率为 68.3%, 在图 1-1-1 中表示曲线下阴影部分面积占总面积的 68.3%。如果扩大置信区间, 置信概率也将提高; 如果区间扩大到 $[-2\sigma, +2\sigma]$ 和 $[-3\sigma, +3\sigma]$, 可以分别得到

$$p(2\sigma) = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(\Delta x) dx = 0.954 \quad (1-1-7c)$$

$$p(3\sigma) = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(\Delta x) dx = 0.997 \quad (1-1-7d)$$

可见, 测量标准差的绝对值大于 3σ 的概率仅为 0.3%, 对于有限次测量, 这种可能性是微乎其微的。因此, 可以认为是测量失误, 应予以剔除。因此, 物理实验中常将 3σ 作为判定数据异常的标准, 3σ 称为极限误差。

(3) 随机误差的实际估算

实际测量中, 测量的次数总是有限的, 而且真值也不可知, 因此, 标准误差只有理论上的意义。对标准误差 $\sigma(x)$ 的实际处理只能估算。实验中我们只知道残差 $v_i = x_i - \bar{x}$ 而不知道误差 Δx_i , 所以实验中我们只能用残差代替误差计算, 用实验标准偏差 $s(x)$ 近似代替标准误差 $\sigma(x)$, 实验标准偏差 $s(x)$ 与残差的关系为

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-1-8)$$

这个公式又称为贝塞尔公式, 它是求实验标准偏差的常用公式。

应当指出, $s(x)$ 是从有限次测量中计算出来的, 只有测量次数较多时, 其相应的置信概率才接近 68.3%。

(4) 平均值的实验标准偏差

如果在完全相同的条件下进行多次多组重复测量,可以得到许多个测量列,每个测量列的算术平均值不尽相同,它们围绕被测量真值有一定的分散,但仍服从正态分布。由误差理论可以证明,平均值 $\bar{x}$ 的实验标准偏差 $s(\bar{x})$ 为

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \tag{1-1-9}$$

式(1-1-9)表明,平均值的实验标准偏差 $s(\bar{x})$ 是 n 次测量中任一次测量值实验标准偏差 $s(x)$ 的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 倍。

由此可知,增加测量次数,可以减小平均值的实验标准偏差,提高测量的准确度。但是,单凭增加测量次数来提高准确度的作用是有限的,当 $n > 10$ 时,随测量次数 n 的增加, $s(\bar{x})$ 减小得很缓慢。因此,在多次测量时,一般取 10 次左右就够了。

(5) 仪器的标准偏差

测量是用仪器或量具进行的,有的仪器灵敏度较高,有的仪器灵敏度较低,但任何仪器均存在误差。我们把在正确使用仪器的条件下,测量所得结果的最大误差称为仪器的误差限,用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示。

仪器的误差限一般由生产厂家在仪器铭牌或仪器说明书中给出。对于未说明仪器误差限、又不知道仪器准确度级别的,可根据具体情况做出合理的估算,例如取仪器最小分度值作为仪器误差限。表 1-1-1 列出了实验室常用仪器的误差限。

表 1-1-1 物理实验中常用仪器的误差限 $\Delta_{\text{仪}}$

仪器	$\Delta_{\text{仪}}$	备注
米尺(最小刻度 1 mm)	0.5 mm	
游标卡尺(20、50 分度)	最小分度值 (0.05 mm、0.02 mm)	
螺旋测微器(0~50 mm)	0.004 mm	
物理天平(0.1 g)	0.05 g	
各类数字式仪表	仪器最小读数	
分光计(浙江光学仪器厂)	最小分度值(1')	
电磁仪表(指针式电压表、电流表)	(AK) %	A 是量程, K 是仪表准确度等级
其他仪器	由实验室给出	

一般仪器误差概率密度函数遵从均匀分布的规律,如图 1-1-2 所示。在 $-\Delta_{\text{仪}}$ 到 $\Delta_{\text{仪}}$ 的范围内,各种误差出现的概率相同,在区间以外误差出现的概率为零。由数学计算可得仪器的标准误差 $\sigma_{\text{仪}}$ 为

$$\sigma_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \tag{1-1-10}$$

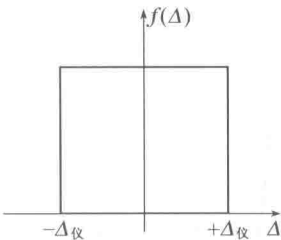


图 1-1-2 一般仪器误差概率密度函数分布

第二节 测量结果的不确定度评定

一、表征测量结果质量的指标

1. 精密度、准确度和精确度

精密度、准确度和精确度都是评价测量结果好坏的指标,但这三个指标的含义不同,使用时应加以区别。

精密度是衡量多次测量数值之间互相接近程度的量,它反映随机误差大小的程度。测量精密度高,是指测量数据比较集中,随机误差小。但是,精密度不能确定系统误差的大小。

准确度是反映所测数值与真值接近程度的量,它反映系统误差大小的程度。测量准确度高,是指测量数据的平均值偏离真值较少,系统误差小。但是,准确度不能确定数据分散的情况,即不能反映随机误差的大小。

精确度是指测量数据比较集中在真值附近,它反映系统误差与随机误差综合大小的程度。测量精确度高,是指测量数据既比较集中一致,又在真值附近,即测量的系统误差和随机误差都比较小。现以射击打靶的弹点分布为例说明这三个指标的意义。

如图 1-2-1 所示,图(a)表示精密度高而准确度低,图(b)表示准确度高而精密度低,图(c)表示精密度和准确度均高,即精确度高。通常所说的精度含义不明确,应尽量避免使用。

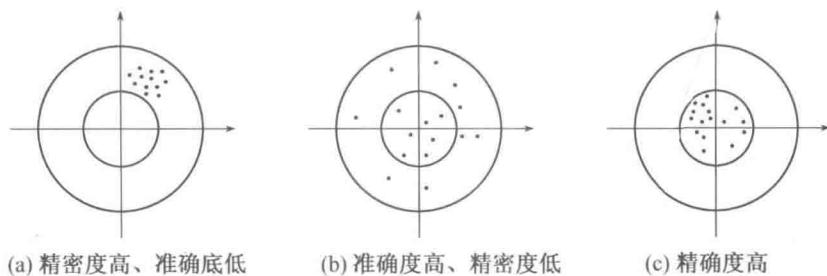


图 1-2-1 精密度、准确度和精确度示意图

2. 测量不确定度

误差是测量值与真值之差,由于真值一般不可能准确地知道,因而测量误差也不可能确切获知,要求得误差的估计值,现实可行的办法就只能根据测量数据和测量条件进行推算。但由于测量误差分析方法的不统一,影响了计量测试乃至整个科学技术的交流和发展。于是国际标准化组织等七个国际组织于 1993 年联合公布了《测量不确定度表示指南》(以下简称《指南》),它对当前国际上在评定测量结果可靠性方面进行了新的约定,目的是统一测量不确定度的评定与表示方法。

《指南》对实验的测量不确定度有十分严格而详尽的论述,限于本课程的性质,只要求对不确定度的下述基本概念有初步的了解。

测量不确定度是指由于误差的存在而对测量结果不能肯定的程度,它是与测量结果相关的参数,表征合理赋予的被测量值之间的分散性,即提供测量结果的范围,使被测量的真值能以一定概率位于其中。

显然,不确定度小的测量结果,其可信赖程度高,反之则低。

由于误差来源众多,测量结果不确定度一般包含几个分量。为了估算方便,按估计误差数值的不同方法,可以将其分为 A、B 两类分量。

二、不确定度的分类

(1) A 类不确定度(不确定度的 A 类分量):用统计的方法分析评定的不确定度,用 u_A 表示。

对某物理量 x 做 n 次独立的测量,测量值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 则直接测量量的 A 类不确定度分量就用平均值的实验标准偏差乘以 t 因子表示,即

$$u_A = t \cdot s(\bar{x}) = t \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-2-1)$$

t 因子与测量次数和置信概率有关,其数值可以根据测量次数和置信概率查表得到。当测量次数较少或置信概率较高时, $t > 1$; 当测量次数 $n \geq 10$, 且置信概率为 68.3% 时, $t \approx 1$; 在本课程的教学,为了简便,一般就取 $t=1$ 。

(2) B 类不确定度(不确定度的 B 类分量):由非统计的方法分析评定的不确定度,用 u_B 表示。实验中尽管有多方面的因素存在,本课程一般只考虑仪器误差这一主要因素。

我们用仪器的等价标准差 $\sigma_{IX} = \frac{\Delta_{IX}}{\sqrt{3}}$ 近似表示不确定度的 B 类分量,即

$$u_B = \sigma_{IX} = \frac{\Delta_{IX}}{\sqrt{3}} \quad (1-2-2)$$

(3) 直接测量值的合成不确定度。

在各不确定度分量相互独立的情况下,将两类不确定度分量按“方和根”的方法合成,构成合成不确定度,即

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (1-2-3)$$

三、测量结果的表达

1. 直接测量结果的不确定度表示

直接测量量 x 的测量结果常表示为

$$x = \bar{x} \pm u_C(x) \text{ (单位)} \quad (1-2-4)$$

对于测量结果,同时还可以用相对不确定度表示

$$E_r(x) = \frac{u(x)}{x} \times 100\% \quad (1-2-5)$$

例如,所测长度为 $(1.05 \pm 0.02)\text{m}$ 。这是不确定度的一般表示法。

在表示测量结果时,应注意以下几点: