

高等学校规划教材



大学物理实验

D A X U E W U L I S H I Y A N

主 编 桂传友



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
安徽大学出版社



大学物理实验

D A X U E W U L I S H I Y A N

主 编	桂传友	
副 主 编	臧学平	
参编人员	吴卫锋	张慧敏
	程守敬	彭基柱



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
安徽大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/桂传友主编. —合肥:安徽大学出版社, 2015. 8

ISBN 978-7-5664-0958-4

I. ①大… II. ①桂… 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(2015)第 202345

大学物理实验

主 编 桂传友

出版发行: 北京师范大学出版集团
安 徽 大 学 出 版 社
(安徽省合肥市肥西路 3 号 邮编 230039)
www.bnupg.com.cn
www.ahupress.com.cn

印 刷: 合肥添彩包装有限公司
经 销: 全国新华书店
开 本: 184mm×260mm
印 张: 13.5
字 数: 328 千字
版 次: 2015 年 8 月第 1 版
印 次: 2015 年 8 月第 1 次印刷
定 价: 29.80 元
ISBN 978-7-5664-0958-4

策划编辑: 李 梅 张明举
责任编辑: 张明举
责任校对: 程中业

装帧设计: 李 军
美术编辑: 李 军
责任印制: 赵明炎

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 0551—65106311

外埠邮购电话: 0551—65107716

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 0551—65106311

前言

随着我国经济社会的发展,承担着培养高级专门人才、发展科学技术文化、促进社会主义现代化建设的重大任务的高等教育必须适应经济发展的需要。教育部《关于地方本科高校转型发展的指导意见》中明确提出:以培养产业转型升级和公共服务发展需要的高层次技术技能人才为主要目标,以推进产教融合、校企合作为主要路径,通过试点推动、示范引领,引导和推动部分地方本科高校向应用技术类型高校转型发展,提高地方高等教育支撑产业升级、技术进步和社会管理创新的能力,完善现代职业教育体系,促进高等教育特色发展,推动学习型社会建设。从此,地方本科高校的转型发展被提到前所未有的高度。

针对地方应用技术型本科高校的特点,根据《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》和《高等工科本科物理实验课程教学基本要求》,结合池州学院近年来大学物理实验教学改革和课程建设的经验,我们组织编写了本书。

全书共分5章,第1章是通识性的基础知识;第2章是实验的基本理论,包括误差及测量不确定度理论、常用实验数据的处理方法、物理量的测量方法及实验设计的基本知识;第3章是物理实验通用仪器介绍;第4章编入了21个基础性实验项目,通过这些项目的训练,可以使使学生掌握基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能和基本测量方法、误差与不确定度及数据处理的理论与方法等知识;第5章根据应用型本科高校的特点,我们有选择地编入了12个综合设计性实验项目,这些项目有些是来自对传统基础性实验项目的改造,有些是来自地方企业行业,通过这些项目的训练,可以使学生了解科学实验的全过程,逐步掌握科学理论和科学方法,可以培养学生独立实验的能力和运用所学知识解决问题的能力。

全书由桂传友组织编写和统稿,参加本书编写工作的为池州学院正在担任或曾经担任大学物理实验课的教师,他们分别是:桂传友、臧学平、吴卫锋、张慧敏、程守敬、彭基柱等。我们以“立足基础,突出实用,注重实效”为原则,精选实验项目,明确实验目的,优化实验过程,强调学生自主实验。本书编写过程中,借鉴和参阅了兄弟院校的有关教材和经验,甚至引用了某些内容,在此一并致谢。我们还要感谢池州学院教务处、机电工程学院领导的支持和帮助。

编 者

2015 年 5 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 物理实验的重要性	1
§ 1.2 物理实验的目的和要求	2
§ 1.3 如何进行物理实验	2
第 2 章 物理实验的基本理论	4
§ 2.1 测量与误差	4
§ 2.2 测量不确定度的评定	8
§ 2.3 实验数据处理基本方法	13
§ 2.4 物理测量的常用方法	23
§ 2.5 物理实验设计知识	30
第 3 章 物理实验的基本仪器	37
§ 3.1 力学实验基本仪器	37
§ 3.2 热学实验基本仪器	42
§ 3.3 电磁学实验基本仪器	44
§ 3.4 光学实验基本仪器	50
第 4 章 基础性实验项目介绍	54
实验 1 长度测量	54
实验 2 弦振动的研究	58
实验 3 重力加速度的测定(用单摆法)	62
实验 4 伏安法测电阻	65
实验 5 惠斯通电桥测电阻	68
实验 6 霍尔效应	72
实验 7 刚体转动惯量的测定	77
实验 8 示波器的使用	83
实验 9 磁场的描绘	89

实验 10	地球磁场水平分量的测定	92
实验 11	牛顿第二定律的验证	96
实验 12	液体折射率和平均色散的测定	99
实验 13	薄透镜焦距的测定	105
实验 14	导热系数的测定	108
实验 15	空气比热容比的测量	112
实验 16	测定液体的黏度系数	117
实验 17	RLC 稳态特性的研究	120
实验 18	光栅衍射测波长	125
实验 19	LD 的 $V-I$ 特性曲线测试	129
实验 20	光耦伏安特性测量实验	131
实验 21	太阳能电池特性测量实验	133
第五章	综合设计性实验项目介绍	137
实验 22	迈克尔逊干涉仪的调整及使用	137
实验 23	分光计的调整和棱镜折射率的测定	144
实验 24	夫兰克—赫兹实验	151
实验 25	杨氏弹性模量的测量(用拉伸法)	156
实验 26	表面张力系数的测定	160
实验 27	用牛顿环测透镜的曲率半径	164
实验 28	声速的测定	172
实验 29	光学全息照相	176
实验 30	电涡流传感器的位移特性实验	179
实验 31	用三线摆法测定物体的转动惯量	183
实验 32	压阻式压力传感器的特性测试实验	188
实验 33	直流应变片全桥的应用——电子称实验	192
附 录		197
附录 A	中华人民共和国法定计量单位	197
附录 B	常用物理数据	200
附录 C	常用电气测量指示仪表和附件的符号	208
主要参考文献		210

第 1 章 绪 论

§ 1.1 物理实验的重要性

物理学是人类认识自然世界和人类自身的重要学科,在世界的文明进步中起着举足轻重的作用,它是一门建立在实验基础上的自然科学。早在 400 年前伽利略(Galileo)的时代,人们就认识到“物理学首先应是一门实验科学”。在物理学的发展过程中,物理实验一直起着直接推动或标尺作用。著名物理学家、诺贝尔物理学奖获得者海森堡(W. Heisenberg)说:“显而易见,不论在那里,实验方面的研究总是依靠思辨来取得的。”另一方面,实验结果向前发展的方向,总是通过理论的途径来实现的。他道出了理论与实验之间相互依存的关系。不论是牛顿三定律、万有引力还是麦克斯韦电磁理论无不是建立在大量实验研究的基础上。在 20 世纪前夕,当物理学家正高兴地认为“在已经建成的科学大厦中,后辈物理学家只要做一些零碎地修补工作就行了”的时候,热辐射实验和迈克尔逊—莫雷实验——“两朵乌云”,使物理学发生了巨大的革命,建立了现代物理学的两大基石——量子论和相对论。

现代高新科技的发展更是离不开物理学的理论和物理实验的原理和方法。物理实验在工农业、国防军事及其他学科都有广泛的应用,例如对 DNA 结构的剖析、化学等学科中对物质材料的分析、上海的磁悬浮列车以及美国二次对伊战争的精确制导武器等。

总之,物理学从本质上说是一门实验的科学,物理概念的建立和物理规律的发现都是以严格的实验事实为基础,并且不断受到实验的检验。物理学在自然科学其他领域、各高新技术领域的广泛应用也离不开实验。大学物理实验是对高等学校学生进行基本科学实验训练的一门独立的必修基础课程,它不仅可以使学生对物理理论的理解,而且可以使学生获得基本的实验知识,让学生在实验方法和实验技能等方面受到较系统而严格的训练。同时,在培养科学工作者的良好素质及科学世界观方面,大学物理实验也起着潜移默化的作用。因此,学好大学物理实验对于高校理工科学生是十分重要的。

§ 1.2 物理实验的目的和要求

大学物理实验的主要目的和要求有以下三个方面:

①通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,使学生进一步掌握物理实验的“基本知识、基本方法和基本技能”(即三基能力);并能运用物理学原理和物理实验方法来研究物理现象和规律,加深对物理学原理的理解。

②培养与提高学生从事科学实验的素质。其中包括: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;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;以及在实验过程中相互协作、共同探索的团队合作精神。

③培养和提高学生科学实验的能力。其中包括:自学能力,能够自行阅读实验教材和资料,正确理解实验内容,做好实验前的准备;动手实践能力,能够借助教材和仪器说明书,正确调整和使用仪器;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;表达书写能力,能够正确记录和处理实验数据,绘制图线,说明实验结果,撰写合格的实验报告;简单的设计能力,能够根据课题要求,确定实验方法和条件,合理选择仪器,拟定具体的实验程序。

在教师指导下,了解和掌握科学实验的主要过程和方法,通过动手动脑,训练和培养独立工作的能力,提高科学素养,为后续课程学习以及进行课程设计、科学研究打下基础。

§ 1.3 如何进行物理实验

物理实验课基本上是按照以下的基本程序进行的:

1. 实验前的预习

①仔细阅读教材,弄清实验目的、实验原理、实验内容和步骤、测量方法、主要实验仪器的构造、使用方法和注意事项。

②在自备或专用报告纸上写出预习报告。其内容包括:实验名称、实验日期、实验目的与要求、实验原理(原理示意图、电学和光学实验还应画出简单的电路和光路图)、主要实验步骤、所用实验仪器(名称、规格和编号可在进入实验室后填写)、设计数据表格(表格单独用纸,画大些,并写出被测物理量名称、单位)。

2. 实验操作

①进入实验室后,应对照实验设备实物,熟悉仪器及其应用,在实验室规定的条件下安装、调整仪器或连接线路。接下来,必须经教师检查无误后,才能按照实验要求、内容及步骤,独立思考,逐步逐项进行实验操作,观察实验现象,测量实验数据。测量原则是:先定性后定量,先试测再进行正式测量。同时,将实验数据记录在事先准备好的数据表格中。

②实验过程中随时记入预习报告所列数据表格中的实验测量数据,被称为“原始数据”。记录原始数据应注意有效数字的位数,并与数据表格中物理量的单位相对应。原始数据不得涂改。如确系记错,可在数据上画一道,并在旁边写上更正数据。必须指出,原始数据测量的准确与否,是决定实验质量的主要因素,应特别注意。

③预习报告中所列的其他数据,如测量日期、仪器编号等,可在定量测量之前先一一记录好,有的实验还需记录室温、大气压强、湿度等数据,这些会有任课老师告知。

④实验数据须由任课老师审阅,审阅合格后经任课老师签字,下次试验时与实验报告一并交予任课老师。须将仪器整理复原后,方可离开实验室。

3. 处理数据并写出完整的实验报告

正确书写实验报告,是物理实验基本训练的内容之一,它是在整理实验数据的基础上,得出所做实验的最后结果以及对其做全面的分析和总结,因而不等同于预习报告。

实验报告包括以下内容:

①实验名称、日期、班级、姓名。

②实验目的和要求。

③主要仪器的名称、规格、编号。

④基本原理及主要公式(力学实验要画示意图,电学实验要画电路图,光学实验要画光路图,实验原理叙述和公式推导等)。

⑤实验简要步骤。

⑥数据表格及处理。原始数据要重新整理,整齐地抄录在实验报告的正式表格中。根据实验误差理论及不确定度的表示方法,认真处理数据,得出正确表述的实验结果。需要作图时,一律要求用作图纸,按作图法正确作图处理实验数据。

⑦分析、讨论。要对结果进行必要的分析、讨论,包括回答思考题等。通过分析、讨论可以发现在测量与处理数据中出现的现象,对实验中发现的现象进行解释,对实验装置和方法提出改进意见等。这对于培养和提高学生科学实验的能力是十分有益的。

实验报告要求字迹端正、叙述简练、数据齐全、处理正确、图表规则。数据处理是极易出现错误且不易掌握的内容,学生应在掌握基本实验理论的基础上,通过多次实验数据处理的实践和训练,不断改正错误,逐步掌握。

以上三个基本程序的完成虽然有阶段性,但是它们又是紧密相关的。只有不偏废任何一个程序,认真完成每一个程序的要求,才能做好每一个物理实验。反之,不做任何实验预习,就进行实验操作,操作中敷衍了事,甚至为凑数而任意涂改数据或抄袭别人的报告等,都是不容许的。

第2章 物理实验的基本理论

本章介绍测量误差估计、实验数据处理、实验结果的表示、物理实验常用的方法手段及物理实验的优化设计等初步知识。这些知识不仅在每一个物理实验中都要用到,而且是今后从事科学实验所必须了解和掌握的。测量误差和数据处理的内容涉及面较广,不可能在一两次的学习中掌握。只是通过集中讲授,使同学们对这些问题有一个初步的了解,然后结合每一个具体实验再细读有关段落,通过运用加以掌握。应当指出的是:对这些内容的深入讨论是计量学和数理统计学的任务,本章只能引用其中的某些结论和计算公式,不做详细的证明和探讨。

§ 2.1 测量与误差

2.1.1 测量

物理实验是以测量为基础的。按计量学定义,测量是以确定被测量对象量值为目的的全部操作过程,研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理都要进行测量。测量可分直接测量和间接测量两大类。“直接测量”指无需对被测的量与其他实测的量进行函数关系的辅助计算而直接测出被测量的量。例如用米尺测物体的长度、用天平和砝码测物体的质量、用电流计测电路中的电流等都是直接测量。“间接测量”指利用直接测量的量与被测的量之间已知的函数关系,计算后从而得到被测量的量。例如通过测量物体的体积和质量,再用公式计算出物体的密度。有些物理量既可以直接测量,也可以间接测量,这主要取决于使用的仪器和测量方法。

如果对某一待测量进行多次测量,假定每次测量的条件相同,即测量仪器、方法、环境和操作人员都不变,测得一组数据 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 。尽管各次测量结果并不完全相同,但没有任何理由判断某一次测量更为精确,只能认为测量的精确程度是相同的。于是将这种具有同样精确程度的测量称为“等精度测量”,这样的一组数据称为“测量列”。严格的等精度测量是不存在的,只要有一个测量条件发生变化,这时的测量即为非等精度测量。在实验中保持测量条件完全不变是困难的,但当某一条件的变化对测量结果影响不大或可以忽略时,

可视这种测量为等精度测量。在物理实验中,凡是要求对待测量进行多次测量的均指等精度测量,本课程中有关测量误差与数据处理的讨论,都是以等精度测量为前提的。

2.1.2 量程 精密度 准确度

测量要通过仪器或量具来完成,所以必须对仪器的量程、精密度、准确度、读数规则等有一定的了解和认识。

量程是指仪器所能测量的范围。如 TW-1 物理天平的最大称量(量程)是 1000g,UJ36a 电位差计的量程为 230mV。对仪器量程的选择要适当,当被测量超过仪器的量程时会损坏仪器,这是不允许的。同时也不能一味选择大量程,因为如果仪器的量程比测量值大很多时,测量误差往往会比较大。

精密度是指仪器所能分辨物理量的最小值,一般与仪器的最小分度值一致,最小分度值越小,仪器的精密度越高。如螺旋测微计(千分尺)的最小分度值为 0.01mm,即其分辨率为 0.01mm/刻度,或仪器的精密度为 100 刻度/mm。

准确度是指仪器本身的准确程度。测量是以仪器为标准进行比较,要求仪器本身要准确。由于测量目的不同,对仪器准确程度的要求也不同。按国家规定,电气测量指示仪表的准确度等级 α 分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0,共七级,在规定条件下使用时,其示值 x 的最大绝对误差为

$$\Delta = \pm \text{量程} \times \text{准确度等级} \% \quad (1)$$

例如,0.5 级电压表量程为 3V 时

$$\Delta V = \pm 3 \times 0.5 \% = \pm 0.015 \text{ V}$$

对仪器准确度的选择要适当,在满足测量要求的前提下尽量选择准确度等级较低的仪器。当待测物理量为间接测量时,各直接测量仪器准确度等级的选择,应根据误差合成和误差均分原理,视直接测量的误差对实验最终结果影响程度的大小而定,影响小的可选择准确度等级较低的仪器,否则应选择准确度等级较高的仪器。

测量时的读数要如实、全部地记录仪器的显示数值,一般在直接测量时要求估读出仪器最小分度值的 1/10,但由于某些仪器的分度较窄、指针较粗或测量基准较不可靠时,也可估读 1/5 或 1/2 分度。若仪器的示数不是连续变化,而是以一定的最小步长跳跃变化时(如数字显示仪器),则只能记录所显示的全部数字,无需进行估读。

2.1.3 误差

任何测量结果都有误差。这是因为测量仪器、方法、环境及实验者等都不可能做到绝对严密的结果,这些因素导致测量结果不可避免地存在误差。因此,分析测量中可能产生的各种误差并尽可能消除其影响,对测量结果中未能消除的误差作出合理估计,是实验的重要内容。为此,我们必须了解误差的概念、特征、产生的原因和估算方法等有关知识。

待测量的大小在一定条件下都有一个客观存在的值,称为“真值”。真值是一个理想的概念,一般是不可知的,我们通常所说的真值一般有以下三类:

(1)理论真值或定义真值,如三角形的三个内角之和等于 180° 等;

大学物理实验

(2) 计量学约定真值, 由国际计量大会决议约定的真值。如基本物理常数中冰点绝对温度 $T_0 = 273.15\text{K}$, 真空中光速 $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{m/s}$ 等;

(3) 标准器相对真值, 用比被校仪器级别更高的标准器的量值作为相对真值。例如, 用 1.0 级、量程为 2A 的电流表测得某电路电流为 1.80A, 改用 0.1 级、量程为 2A 的电流表测同样电流时为 1.802A, 则可将后者视为前者的相对真值。

测量误差就是测量结果与被测量的真值之间的差值, 测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量值 x 与真值 x_0 之差称为“误差”, 用 Δx 表示

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

误差 Δx 反映了测量值偏离真值的大小和方向(正负)。测量误差有时常用相对误差 E 表示

$$E = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (3)$$

【例 2.1】 用一块准确度等级为 1.5 级的电流表测量一个精密恒流源 2.000mA 的输出电流。

电流表的三次示值分别为

$$2.02\text{mA}, 2.00\text{mA}, 1.99\text{mA}$$

对应电流表的示值误差分别为

$$0.02\text{mA}, 0.00\text{mA}, -0.01\text{mA}$$

实验结果不仅要包括测量所得的数据, 而且还要包括误差的范围, 要对误差进行研究和讨论, 用误差分析方法来指导实验的全过程。误差分析的指导作用包括以下两个方面:

(1) 为了从测量中正确认识客观规律, 必须分析误差的原因和性质, 正确地处理测量数据, 尽量消除、减少误差, 确定误差范围, 以便能在一定条件下得到接近真值的结果。

(2) 在设计一项实验时, 先对测量结果确定一个误差范围, 然后用误差分析方法指导我们合理选择测量方法、仪器和条件, 以便能在最有利的条件下, 获得恰到好处的预期结果。

测量误差根据其性质和来源可分为系统误差和随机误差两大类, 下面分别讨论。

2.1.4 系统误差

系统误差是指在多次测量同一物理量的过程中, 保持不变或以可预知方式变化的测量误差的分量。系统误差主要来源有以下几个方面:

(1) 仪器的固有缺陷。如仪器刻度不准、零点位置不正确、仪器的水平或铅直未调整、天平不等臂等;

(2) 实验理论近似性或实验方法不完善。如用伏安法测电阻没有考虑电表内阻的影响, 用单摆测重力加速度时取 $\sin\theta \approx \theta$ 带来的误差等;

(3) 环境的影响或没有按规定的条件使用仪器。例如标准电池是以 20°C 时的电动势数值作为标称值, 若在 30°C 条件下使用时, 如不加以修正就引入了系统误差;

(4) 实验者心理或生理特点造成的误差。如计时的滞后, 习惯于斜视读数等。

【例 2.2】 电流表使用前没有调整零值, 电表中虽然没有电流流过, 电表的示值就已经为 0.03mA 了(称为“初读数”)。

电流表初读数:0.03mA,系统误差: +0.03mA。

利用这块表进行测量,其测量结果总是偏大,而且总是偏大一个固定的量 0.03mA,多次测量无法消除这种误差。

【例 2.3】 采用图 2-1-1 所示电路测量电阻,用公式 $R = U/I$ 算得电阻值 R 。 R_A 为串联电流表的内阻。如果用中学常用的算法,将电压 U 除以电流 I ,求得电阻值 R ,那么将会产生大小等于 R_A 的系统误差。测得的 R 值将偏大。

【例 2.4】 用等臂天平称人参的质量,不修正空气的影响,由于人参密度等于钢质砝码的密度,如果不对空气的浮力作出修正,那么测出的人参的实际质量将大于砝码的示值。

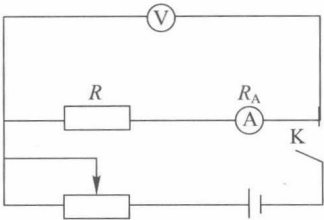


图 2-1-1 伏安法测电阻

对实验中的系统误差应如何处理呢? 可以通过校准仪器,改进实验装置和实验方法,或对测量结果进行理论上的修正加以消除或尽可能减小。发现和减小实验中的系统误差通常是一件困难的任务,需要对整个实验所依据的原理、方法、所用仪器和测量步骤等可能引起误差的各种因素一一进行分析。一个实验结果是否正确,往往就在于系统误差是否已被发现和尽可能消除,因此对系统误差不能轻易放过。

2.1.5 随机误差

随机误差是指在多次测量同一被测量的过程中,绝对值和符号以不可预知的方式变化着的测量误差的分量。随机误差是实验中各种因素的微小变动引起的,主要有:

(1)实验装置在各次调整操作时的变动性。如仪器精度不高,稳定性差,测量示值变动等;

(2)观察者本人在判断和估计读数上的变动性。主要指观察者的生理分辨本领、感官灵敏程度、手的灵活程度及操作熟练程度等带来的误差;

(3)实验条件和环境因素的变动性。如气流、温度、湿度等微小的、无规则的起伏变化,电压的波动以及杂散电磁场的不规则脉动等引起的误差。

这些因素的共同影响使测量结果围绕测量的平均值发生涨落变化,这一变化量就是各次测量的随机误差。随机误差的出现,就某一测量而言是没有规律的,当测量次数足够多时,随机误差服从统计分布规律,可以用统计学方法估算随机误差。

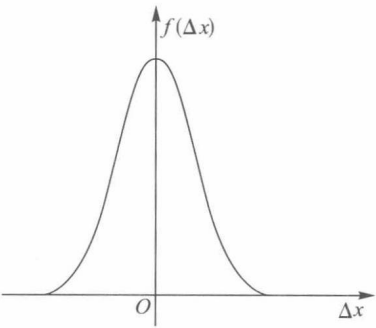


图 2-1-2 正态分布

随机误差的分布形式有很多,经典误差理论中最典型的、最常讨论的分布为正态分布,如图 2-1-2 所示。实验和理论均可证明,在等精度测量条件下,对某一物理量进行重复多次测量时,服从正态分布(也称“高斯分布”)的随机误差,具有以下特征:

- ①有界性:绝对值很大的误差出现的概率为零,即随机误差的出现不会超过一定的范围。
- ②单峰性:绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率要大,而且小误差的出现有一

极大值。

③对称性:绝对值相等的正的和负的误差出现的概率相等。

④抵偿性:随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋于零。

对于不同的统计分布,一般都有两个重要的特征参量:平均值和标准偏差。怎样用这两个特征参量来进行数据处理?

(1)取算术平均值作为测量列的最佳值(最佳估计值)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

在大多数情况下,随机误差的分布具有抵偿性。当测量次数足够多时,符号为正的误差和符号为负的误差分布基本对称,可以大致相消。因此用算术平均值作为测量列的最佳值,可以减小随机误差的影响。

(2)用标准偏差 S_x 表征测量列中各测量值 x_i 的分散性, S_x 用 Bessle 公式算出

$$S_x = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

S_x 小 $\Rightarrow$ 测量列中测量值密集,数据的分布范围小,测量的精密度高;

S_x 大 $\Rightarrow$ 测量列中测量值分散,数据的分布范围大,测量的精密度低。

S_x 值直接体现了随机误差的分布特征。参见图 2-1-3,不同 S_x 值时正态分布曲线。目前很多函数计算器都有这种统计功能用来计算 S_x ,可以利用计算器很方便地直接求得 S_x 、 $\bar{x}$ 。

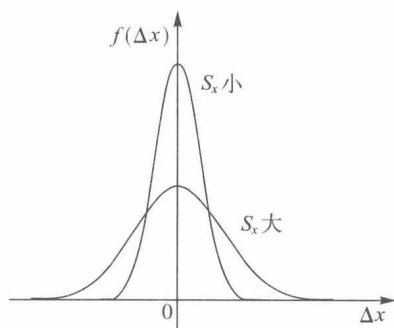


图 2-1-3 不同 S_x 值的正态分布曲线

除系统误差和随机误差外,还可能发生人为读数、记录上的错误或仪器故障、操作不正确等造成的错误。错误不是误差,要及时发现并在数据处理时予以剔除。

§ 2.2 测量不确定度的评定

测量的目的是不但要测量待测物理量的近似值,而且要对近似真实值的可靠性做出评定(即指出误差范围),这就要求我们还必须掌握不确定度的有关概念。1995 年,由七个国际组织修订后的《测量不确定度表示指南》(简称 UGM)公布于世,立即被世界范围内各个国家所采用,我国于 1999 年采用 UGM,批准发布了 JJF1059-1999《测量不确定度评定与表示》的计量技术规范。下面将结合对测量结果的评定对不确定度的概念、分类、合成等问题进行讨论。

2.2.1 不确定度的基本概念

由于测量不可避免存在误差,所以用测量结果作为被测量真值的估计值自然要有偏差。测量不确定度就是对测量结果的偏差做全面的评估。不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度,是表征被测量的真值所处的量值范围的评定。测量结果应给出被测量的量值 X , 同时还要标出测量的合成不确定度 U , 写成 $x = X \pm U$ 的形式, 这表示被测量的真值在 $(X - U, X + U)$ 的范围之外的可能性(或概率)很小。显然, 测量不确定度的范围越窄, 测量结果越可靠。

引入不确定度概念后, 测量结果的完整表达式中应包含: ①测量值和不确定度; ②单位; ③置信度。我国的《测量不确定度评定与表示》中把 $P = 0.95$ 作为广泛采用的约定概率, 当取 $P = 0.95$ 时, 可不必注明。

与误差表示方法一样, 引入相对不确定度 E_x , 即不确定度的相对值

$$E_x = \frac{U_x}{X} \times 100\% \quad (6)$$

其中, U_x 表示被测量的合成不确定度, X 表示被测量的量值。

2.2.2 不确定度的简化估算方法

不确定度是由误差引起的, 由于误差的复杂性, 准确计算不确定度不是一件简单的事情, 已经超出了本课程的范围。因此物理实验中采用具有一定近似性的不确定度估算方法。

不确定度按其数值的评定方法可归并为两类分量, 即多次测量用统计方法评定的 A 类分量 U_A ; 用其他非统计方法评定的 B 类分量 U_B 。合成不确定度由 A 类分量和 B 类分量按“方、和、根”的方法合成, 即

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (7)$$

一、 A 类分量的估算

在实际测量中, 一般只能进行有限次测量, 这时测量误差不完全服从正态分布规律, 而是服从 t 分布(又称“学生分布”)的规律。在这种情况下, 对测量误差的估计, 就要在贝塞尔公式(5)的基础上再乘上一个因子。在相同条件下对同一被测量作 n 次测量, 若只计算合成不确定度 U 的 A 类分量 U_A , 那么它等于测量值的标准偏差 S_x 乘以一因子 $t_P(n-1)/\sqrt{n}$, 即

$$U_A = \frac{t_P(n-1)}{\sqrt{n}} S_x \quad (8)$$

式(8)中, $t_P(n-1)$ 是与测量次数 n 、置信概率 P 有关的量, 置信概率 P 及测量次数 n 确定后, $t_P(n-1)$ 也就确定了, 可从专门的数据表中查得。在 $P = 0.95$ 时, $t_P(n-1)/\sqrt{n}$ 的部分数据可以从下表查得。

测量次数 n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_P(n-1)/\sqrt{n}$	8.98	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72

物理实验中测量次数 n 一般不大于 10, 从该表中可以看出, 当 $n = 6 \sim 8$ 时, 因子 $t_P(n-1)/\sqrt{n}$ 近似取为 1, 误差并不很大。这时式(8)可简化为

$$U_A = S_x \tag{9}$$

有关的计算还表明, 在 $n = 6 \sim 8$ 时, 作 $U_A = S_x$ 近似, 置信概率近似为 0.95 或更大。即当 $6 \leq n \leq 8$ 时, 取 $U_A = S_x$ 已足以保证被测量的真值落在 $\bar{x} \pm S_x$ 范围内的概率接近或大于 0.95。所以我们可以直接把 S_x 的值当作测量结果的合成不确定度的 A 类分量 U_A 。当然, 测量次数 n 不在上述范围或要求误差估计比较精确时, 要从有关数据表中查出相应的因子 $t_P(n-1)/\sqrt{n}$ 的值。

二、B 类分量的简化估算

作为基础训练, 在物理实验中一般只考虑仪器误差所带来的合成不确定度的 B 类分量。

测量是用仪器或量具进行的, 任何仪器都存在误差。仪器误差一般是指误差限, 即在正确使用仪器的条件下, 测量结果与真值之间可能产生的最大误差, 用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示。仪器误差产生的原因和具体误差分量的分析计算已超出了本课程的要求范围。我们约定, 大多数情况下简单地把仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 直接当作合成不确定度中用非统计方法估计的 B 类分量 U_B , 即

$$U_B = \Delta_{\text{仪}} \tag{10}$$

物理实验中几种常用仪器的仪器误差见下表。

仪器名称	量程	分度值(准确度等级)	仪器误差
钢直尺	0~300mm	1mm	$\pm 0.1\text{mm}$
钢卷尺	0~1000mm	1mm	$\pm 0.5\text{mm}$
游标卡尺	0~300mm	0.02, 0.05, 0.1mm	分度值
螺旋测微计(一级)	0~100mm	0.01mm	$\pm 0.004\text{mm}$
TW-1 物理天平	1000g	100mg	$\pm 50\text{mg}$
WL-1 物理天平	1000g	50mg	$\pm 50\text{mg}$
TG928A 矿山天平	200g	10mg	$\pm 5\text{mg}$
水银温度计	-30~300℃	0.2, 0.1℃	分度值
读数显微镜		0.01mm	$\pm 0.004\text{mm}$
数字式测量仪器			最末一位的一个单位或按仪器说明估算
指针式电表		$a = 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0$	$\pm \text{量程} \times a\%$