

大学物理实验

孙丽媛 祖新慧 主编

清华大学出版社

035780410

内 容 简 介

本书是根据《高等工科大学物理实验教学基本要求》，结合编者多年物理实验教学经验编写而成，具有内容新、体系新的特点。全书分为误差理论、数据处理、实验技术、基础实验及综合设计性实验。本书注重实验内容的新颖性、综合性，注重培养学生的动手能力和创新意识，既保证对实验教学要求的贯彻，又促进学生个性的发展，为学生提供良好自主学习空间。

本书可作为高等学校理工科各类专业的物理实验教学用书。

大学物理实验

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

主 编 孙丽媛 祖新慧

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/孙丽媛，祖新慧主编. --北京：清华大学出版社，2014

ISBN 978-7-302-35307-2

I. ①大… II. ①孙… ②祖… 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 018831 号

责任编辑：邹开颜 赵从棉

封面设计：常雪影

责任校对：王淑云

责任印制：杨 艳

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084

社总机：010-62770175 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：北京嘉实印刷有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm

印 张：11

字 数：266 千字

版 次：2014 年 4 月第 1 版

印 次：2014 年 4 月第 1 次印刷

印 数：1~3000

定 价：20.00 元

产品编号：055299-01

前 言

全书共分5章内容。第1章主要介绍测量误差基础理论,第2章主要介绍实验数据处理的基本方法,第3章主要介绍仪器基本调节及操作技术。这3章的内容用于解决学生只管做实验而忽视误差理论的研究、数据处理能力薄弱、仪器的调节和操作规程不清楚的问题。第4章和第5章是实验内容。实验内容按照基础性、综合设计性及研究型的难易程度编写,与学生的知识水平及能力相适应,既有知识的系统性又有相对独立性。教材内容丰富、注意物理实验内容的先进性同时兼顾传统、经典的著名实验。欢迎学生在学习中对本教材的实验项目提出新的想法和改进意见,并能自主提出实验课题,利用实验室的条件进行研究性学习。

本书由孙丽媛、祖新慧主编。参加本书编写的有朴林鹤(4.15,4.19,5.2,5.11节)、祖新慧(4.14,5.12节)、潘哲峰(4.12,4.17,4.18节)、周永军(4.1,4.3,5.4,5.7节)、吴迪(4.2,4.5,4.7,4.8,5.3,5.5,5.8节)、栾玉国(4.4,4.9,4.13,4.16节)、杨智(4.10,5.1,5.6,5.13节)、杨迪(4.6,5.9节,附录)、李健(4.11,5.10节)、孙丽媛(绪论、第1~3章)。

祖新慧、朴林鹤、周永军、杨迪对本书作了全面审阅和修改,栾玉国负责全书的排版及编辑工作,谨向他们致以衷心感谢。

由于编写者的水平有限,书中难免有不足之处,敬请使用本教材的教师、同学批评指正。

2.5 教学中常用仪器误差限 $\Delta_{\text{允}}$	23
第3章 基本实验技术	24
3.1 仪器的基本调节技术	24
3.2 基本操作技术	26
第4章 基础实验项目	29
4.1 固体密度测量	29
4.2 牛顿第二定律的验证	31
4.3 用单摆测重力加速度	36
4.4 三线摆实验	38
4.5 拉伸法测弹性模量	42
4.6 液体粘滞系数的测定	46
4.7 用恒定电流场模拟静电场	49
4.8 电学元件伏安特性的测量	51

编 者

2013年6月

目 录

绪 论	1
第 1 章 测量误差基础理论	4
1.1 测量	4
1.2 真值与误差	5
1.3 测量不确定度	8
1.4 有效数字及运算	12
1.5 实验测量结果的表示	14
第 2 章 实验数据处理的基本方法	17
2.1 列表法	17
2.2 作图法	18
2.3 逐差法	20
2.4 最小二乘法	21
2.5 教学中常用仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}}$	23
第 3 章 基本实验技术	24
3.1 仪器的基本调节技术	24
3.2 基本操作技术	26
第 4 章 基础实验项目	29
4.1 固体密度测量	29
4.2 牛顿第二定律的验证	31
4.3 用单摆测重力加速度	36
4.4 三线摆实验	38
4.5 拉伸法测弹性模量	42
4.6 液体粘滞系数的测定	46
4.7 用恒定电流场模拟静电场	49
4.8 电学元件伏安特性的测量	51

4.9	直流电桥测电阻	55
4.10	示波器的原理和使用	59
4.11	用示波器测动态磁滞回线	68
4.12	用霍尔元件测磁场	73
4.13	透镜焦距的测定	78
4.14	分光计的调整和使用	84
4.15	光栅衍射实验	89
4.16	用牛顿环测曲率半径	92
4.17	迈克耳孙干涉仪的调整与使用	97
4.18	迈克耳孙干涉仪测空气折射率	101
4.19	黑白摄影与放大	103
第5章	综合设计性实验	108
5.1	声速的测量	108
5.2	空气比热容比的测量	113
5.3	密立根油滴实验	115
5.4	夫兰克-赫兹实验	122
5.5	光电效应测定普朗克常数	126
5.6	动态法测定金属杨氏模量	131
5.7	阻尼振动与受迫振动	136
5.8	地磁场的测量	143
5.9	半导体热敏电阻特性的研究	148
5.10	直流电路设计实验——电表的改装与校准	151
5.11	金属丝电阻率的测量	153
5.12	单丝直径的测量	154
5.13	电压补偿及电流补偿实验	156
附录A	大学物理实验报告的书写	159
附录B	中华人民共和国法定计量单位	161
附录C	常用物理数据	164
参考文献		170

绪 论

感测到,是随温度变化的,且量测时常常有误差,量测时要特别注意,量测时要特别注意,量测时要特别注意。

(2) 测数据,通常是用较短的时间,测出数据,然后进行分析,找出规律,并画出图表,以便进一步分析。

此外,在实验过程中,还要注意安全,特别是用电时,要特别注意安全,不要触电。

数据之间应有一定的间隔,以便补充或修改。若,在实验过程中,发现数据有异常,应立即停止实验,并找出原因。

上面轻轻画上一笔,在其旁边写上正负号,以便进一步分析。

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学科。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是自然科学和工程技术的基础。

物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

一、课程的地位、作用和任务

物理实验课是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。

物理实验覆盖面广,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。这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。
2. 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。
3. 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。

二、教学内容基本要求

大学物理实验应包括普通物理实验(力学、热学、电学、光学实验)和近代物理实验,具体的教学内容基本要求如下。

1. 掌握测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的基本能力。

(1) 掌握测量误差与不确定度的基本概念,能逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估。

(2) 掌握处理实验数据的一些常用方法,包括列表法、作图法和最小二乘法等。随着计算机及其应用技术的普及,应包括用计算机通用软件处理实验数据的基本方法。

2. 掌握基本物理量的测量方法。

例如:长度、质量、时间、热量、温度、湿度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、光

强度、折射率、电子电荷、普朗克常量、里德堡常量等常用物理量及物性参数的测量,注意加强数字化测量技术和计算技术在物理实验教学中的应用。

3. 了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用。

例如:比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法和干涉、衍射法,以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法。

4. 掌握实验室常用仪器的性能,并能够正确使用。

例如:长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光仪、光谱仪、常用电源和光源等常用仪器。

各校应根据条件,在物理实验课中逐步引进在当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术,例如,激光技术、传感器技术、微弱信号检测技术、光电子技术、结构分析波谱技术等。

5. 掌握常用的实验操作技术。

例如:零位调整、水平/铅直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查与排除,以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节方法。

6. 适当介绍物理实验史料和物理实验在现代科学技术中的应用知识。

三、能力培养基本要求

1. 独立实验的能力——能够通过阅读实验教材、查询有关资料和思考问题,掌握实验原理及方法,做好实验前的准备;正确使用仪器及辅助设备,独立完成实验内容,撰写合格的实验报告;培养独立实验的能力,逐步形成自主实验的基本能力。

2. 分析与研究的能力——能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行分析、判断、归纳与综合。掌握通过实验进行物理现象和物理规律研究的基本方法,具有初步的分析与研究能力。

3. 理论联系实际的能力——能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题的科学方法,逐步提高综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

4. 创新能力——能够完成符合规范要求的设计性、综合性内容的实验,进行初步的具有研究性或创意性内容的实验。激发学习主动性,逐步培养创新能力。

四、物理实验课程基本过程

1. 实验前的预习

预习是对实验项目过程有个基本的了解,须理解物理实验原理,清楚待测物理量与直接测量的物理量之间的关系;了解实验所需的仪器设备;了解在实验中的关键点,便于顺利地进行实验;把预习情况写在实验报告本的预习报告中,其中应含实验原理、待测量与实测量关系、仪器调整的主要步骤等。

2. 进行实验

课堂上进行实验是实验课的中心环节,对照仪器进一步熟悉仪器的工作原理和使用方法还是必要的。

(1) 一般仪器都要调整:如天平的水平、平衡调节,光路的同轴等高调节,各类仪器的

零点调节,等等。

(2) 测数据,通常是用较短的时间经过粗略的测量,调整或选定合理的测量范围、测量间隔以及仪器的量程,了解大致的规律,而后重新进行仔细的测量并在报告本上记录数据。

(3) 记录中至少要包括实验条件,测量量(含单位),仪器名称、型号、量程、精度等。数据之间应留有一定的间隙,以便补充或修改。若当时认为错的数据,也不要毁掉,在错数据上面轻轻画上“—”,在其旁边写上正确的数据。记录数据一定要注意有效数字,而且用简略的文字加以说明。记录数据时学生需要根据所测的内容自行设计表格,表达自己的实验工作内容。

3. 写实验报告

实验报告是实验工作的全面总结,要简明扼要、准确地表达实验的全貌。报告要求文字通顺、字迹端正、图表规矩、结果正确、讨论认真。学生做完实验应尽早写实验报告。

实验报告应包含如下内容:①实验名称。②实验目的。③实验原理:实验原理应包含理论依据和某一量的测量原理或仪器原理,要列出主要公式,画出原理图、实验装置及实验系统框图。④实验步骤:须写明重要而且不能颠倒顺序的实验步骤及所使用的仪器型号、规格、精度(分度值)等。数据应当以表格形式表示,注意单位和有效数字,重要的实验条件必须填入。⑤数据处理:对于重要的计算及不确定度的计算过程应简略地表示出来。⑥实验结果:应写清最后待测量及不确定度。⑦误差分析:一般讨论的误差分析是对结果影响较大的误差进行分析,要抓住主要的、具体的因素,做一些接近量化的分析讨论。

在实验报告最后,学生还可以分析出实验的重点、难点,谈谈体会较深的地方是什么。

强度、折射率、电子电荷、普朗克常量、里德堡常量等常用物理量及物性参数等。随着测量精度提高,测量仪器和测量方法不断改进,测量精度不断提高,测量结果更加准确。

随着科学技术的发展,测量仪器和测量方法不断改进,测量精度不断提高,测量结果更加准确。测量仪器和测量方法的改进,使得测量精度不断提高,测量结果更加准确。测量仪器和测量方法的改进,使得测量精度不断提高,测量结果更加准确。

第1章 测量误差基础理论

各物理量的测量,都离不开测量。测量是科学研究与工程实践中必不可少的一环。

测量的概念是在我们的生活和生产实践中形成的。买布做衣服,就要用尺子量一量;买米买肉,要用秤来称一称;身体不舒服,要用体温表测一测;做什么事,往往要看一看钟表,以便确定时间……这些都是测量。现代科学技术,更离不开测量了。例如汽车,有几千个零件,在生产时,尺寸如果量得不准,就装不上去。没有高度准确的测量,现代科学技术和现代工业生产就不可能进行。

测量的概念是在我们的生活和生产实践中形成的。买布做衣服,就要用尺子量一量;买米买肉,要用秤来称一称;身体不舒服,要用体温表测一测;做什么事,往往要看一看钟表,以便确定时间……这些都是测量。现代科学技术,更离不开测量了。例如汽车,有几千个零件,在生产时,尺寸如果量得不准,就装不上去。没有高度准确的测量,现代科学技术和现代工业生产就不可能进行。

物理实验是以测量为基础。所谓测量,就是用合适的工具或仪器,通过科学的实验方法找出物理量量值的过程。物理量的测量是物理实验的基本操作过程,是把待测量与选定计量标准单位的同类物理量进行比较的全部操作,可以直接或间接地得到所需要的量值。选定计量标准的同类物理量称为单位,比较的结果即为实验数据。测量结果应包括数值(即度量的倍数)、单位(即选定的物理量)及结果可信赖的程度(用不确定度表示)。

按照测量结果获得的方法来分,测量可分为直接测量和间接测量。凡是使用仪器或量具就可直接得到被测量值的测量称为直接测量。例如:用直尺测量长度;以表计时间;用天平称质量;以安培表测电流。从一个或几个直接测量结果按一定的函数关系计算出来的过程,称为间接测量。例如:物体匀速运动的速度的测定需要通过测量物体运动的距离和时间,然后利用三者之间的关系才可以得到速度的测量值。测量记录的是实验数据,实验数据应包含测量值的大小和单位,二者是缺一不可的。

物理量的计量单位采用国际单位制(SI),也是我国法定计量单位。国际单位制是1971年第十四届国际计量大会确定的。国际单位制规定了七个物理量的单位为基本单位:长度——米(m)、质量——千克(kg)、时间——秒(s)、电流——安培(A)、热力学温标——开尔文(K)、物质的量——摩尔(mol)和发光强度——坎德拉(cd),还规定了两个辅助单位:平面角——弧度(rad)和立体角——球面度(sr)。其他一切物理量的单位则是由以上基本单位按一定的计算关系式导出的。如体积单位(m^3)、密度单位(kg/m^3)等都称为国际单位制的导出单位。

一个物理量能否直接测量不是绝对的。随着科学技术的发展、测量仪器的改进,很多原来只能间接测量的量,现在可以直接测量了。比如电能的测量本来是间接测量,现在也可以用电表来进行直接测量。物理量的测量大多数是间接测量,但直接测量是一切测量的基础。

按照测量条件来分,测量可分为等精度测量和非等精度测量。在相同的条件下,对某一

物理量 x 进行多次测量得到的一组测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 称作等精度测量。相同的条件是指同一个人,用同一台仪器,每次测量时周围环境条件相同,等精度测量每次测量的可靠程度相同。反之,若每次测量时的条件不同,或测量仪器改变,或测量方法、条件改变,这样所进行的一系列测量叫做非等精度测量。非等精度测量的结果,其可靠程度自然也不相同。物理实验中大多采用等精度测量。应该指出:多次测量必须是多次进行测量的整个操作过程,而不是仅仅为多次读数。

1.2 真值与误差

1.2.1 真值与误差

真值就是物理量在客观上有着确定的数值,用 x_0 表示。测量的目的就是得到了被测量所具有的客观真实数据,但由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的限制,只能获得该物理量的近似值。也就是说,一个被测量值 x 与真值 x_0 之间总是存在着这种差值,这种差值称为测量误差,用 Δx 表示。即

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

测量误差有正负之分,因为它是指与真值的差值,故常称为绝对误差。注意:绝对误差不是误差的绝对值;真值 x_0 是客观存在的但无法测得,因为测量与误差是形影不离的。

物理实验中真值是一个理想概念。它一般无从得知,因此一般情况下对 x 进行 n 次测量,得 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 用算术平均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-2)$$

作为真值 x_0 的最佳估计。

绝对误差 Δx 反映的是误差本身的大小,但它不能反映误差的严重程度。例如,两个绝对误差 $\Delta x = 2\text{m}$, $\Delta x = 20\text{m}$, 我们不知道它们是在什么测量中产生的,所以难以表达误差的严重程度。如果它们分别对应下面两个测量:测量 100m 跑道的绝对误差是 2m, 测量地球与月球间距 38.4 万 km 的绝对误差是 20m, 显然用绝对误差不足以表述误差的严重程度。根据误差的表示方式,误差分为:

(1) 绝对误差(简称误差)即 Δx 。

(2) 相对误差:绝对误差与真值之比叫相对误差,用 E_r 表示,即

$$E_r = \frac{|\Delta x|}{x_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

相对误差用来表示测量的相对精确度。

误差存在于一切测量之中,测量与误差形影不离,分析测量过程中产生的误差,将影响降低到最低程度,并对测量结果中未能消除的误差做出估计,是实验中的一项重要工作,也是实验的基本技能。

1.2.2 误差分类

根据误差的性质和产生的原因,通常可将误差分为系统误差和随机误差。

系统误差是指在一定条件下多次测量的结果总是向一个方向偏离,其数值一定或按一

定规律变化。系统误差的特征是具有一定的规律性和确定性,测量结果都大于真值或都小于真值。

引起系统误差的原因主要有:

(1) 仪器误差: 仪器本身的缺陷造成。包括仪器的零值误差、示值误差、机构误差、测量附件误差等。

(2) 方法误差: 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,或测量方法等所带来的误差。

(3) 人员误差: 实验者自身的不良习惯而引起。例如,使用秒表计时,有人总是操之过急,总是计时短;有的人则反应迟缓,总是计时长。又例如,有的人对准目标时,总爱偏左或偏右,致使读数偏大或偏小。

(4) 环境误差: 由于实际环境条件与规定条件不一致引起。

在实际测量条件中,多次测量同一量时,误差时大时小、时正时负,以不可预定方式变化,这样的误差叫做随机误差,有时也叫偶然误差。当测量次数很多时,随机误差就显示出明显的规律性。实践和理论都已证明,随机误差服从一定的统计规律(比如正态分布),其特点是: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(单峰性);绝对值相等的正负误差出现的概率相同(对称性);绝对值很大的误差出现的概率趋于零(有界性);误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零(抵偿性)。因此,增加测量次数可以减小随机误差,但不能完全消除。

引起随机误差的原因主要有:

(1) 仪器精密度和观察者感官灵敏度。如仪器显示数值的估读数值偏大或偏小;仪器调节平衡时,平衡点确定不准。

(2) 测量环境扰动变化以及其他不能预测不能控制的因素,如空间电磁场的干扰,电源电压波动引起测量的变化等。总之,实验中任何微小的变化都会带来随机误差。

另外,在实验中还存在实验人员粗心大意、技术不熟练、过度疲劳、操作不正确等原因引起的误差。人们把这类误差称为粗大误差。此类误差无规则可寻,只要加强责任感,细心操作时可以避免。实验中如果发现存在粗大误差的测量值可以划掉,重新测量。处理数据时应首先检查出粗大误差的测量值,剔除掉后再进行数据处理。

1.2.3 误差的处理

1. 系统误差的处理

系统误差虽有其规律性,但要准确找出其误差的原因却没有一定的规律可循。减小和消除系统误差是比较复杂的问题,也是培养学生科学实验能力的一个重要方面。实验者应通过方案的选择、参数设计、器具的校准、条件的控制和对测量结果的修正等方式,尽量消除已定系统误差,减小未定系统误差。

消除系统误差常用的方法有:

(1) 检定修正法: 指将仪器、量具送计量部门检验取得修正值,以便对某一物理量测量后进行修正的一种方法。

(2) 替代法: 指测量装置测定待测量后,在测量条件不变的情况下,用一个已知标准量替换被测量来减小系统误差的一种方法。如消除天平的两臂不等对待测量的影响可用此办法。

(3) 异号法: 指对实验时在两次测量中出现符号相反的误差, 采取平均值后消除的一种方法。例如在外界磁场作用下, 仪表读数会产生一个附加误差, 若将仪表转动 180° 再进行一次测量, 外磁场将对读数产生相反的影响, 引起负的附加误差。两次测量结果平均, 正负误差可以抵消, 从中可以减小系统误差。注意: 在同一测量条件下多次测量求平均并不能减小或消除系统误差。

2. 随机误差的处理

理论与实践均表明, 一组等精度测量数据的随机误差服从一定的统计规律, 最常见的统计规律是正态(高斯)分布, 如图 1-1 所示。

横坐标为 Δx , 纵坐标为误差出现的概率密度 $f(\Delta x)$, σ 为测量列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的标准误差。

图中阴影部分的面积是测量列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 中的任意测量值落在区间 $(x-\sigma, x+\sigma)$ 中的概率。

$[-\sigma, +\sigma]$ 的区间称为置信区间, 测量误差在置信区间内出现的概率为置信概率, 通过理论计算可得到 $[-\sigma, +\sigma]$ 置信区间内的置信概率为 68.3%, 在 $[-2\sigma, +2\sigma]$ 置信区间内的置信概率为 95.4%, 在 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 置信区间内的置信概率为 99.7%。当置信区间增大到对应的置信概率接近 1 时, 说明误差一定出现在该置信区间内, 把这个区间称为极限误差。

σ 是正态分布函数中唯一的参数, 它唯一确定了正态分布曲线形状。不同的测量, 有不同的 σ 值。 σ 值越小, 曲线峰值越高, 图形越尖锐, 这表明测量数据集中, 重复性好。

σ 是测量次数为无限次时的标准误差。由于实际测量中, 测量次数只能是有限次, 而且被测量的真值也不可能准确知道, 因此这一标准误差只具有理论意义。

实际中随机误差的估算则使用偏差, 用偏差代替误差计算。测量列 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ 标准误差的估计值称为标准偏差, 用 S 表示, 即

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-4)$$

此式称为贝塞尔公式。 S 表示测量列中各测量值所对应的标准偏差。

1.2.4 精密度、准确度与精确度

(1) 精密度: 测量结果中随机误差大小的程度。——获得一组测量结果的相互接近程度。

(2) 准确度: 测量结果中系统误差大小的程度。——测量结果与真实值的接近程度。

(3) 精确度: 测量结果中综合误差大小的程度, 即综合评定测量结果重复性以及与其真值一致性的程度。——既有精密度又有准确度。

实验中, 精密度高是指随机误差小, 而数据很集中; 准确度高是指系统误差小, 测量的平均值偏离真值小; 精确度高是指测量的精密度和准确度都高, 数据集中而且偏离真值小, 即随机误差和系统误差都小。如图 1-2 所示, 图(a)是准确度较高、精密度低; 图(b)是精密度高、准确度低; 图(c)是精确度高。

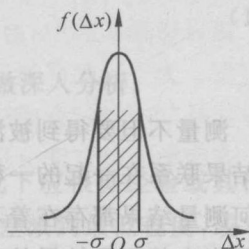


图 1-1 正态分布图

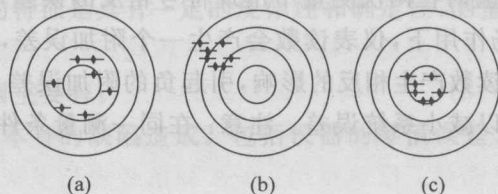


图 1-2 打靶示意图

1.3 测量不确定度

测量不但要得到被测量的最佳估计值,而且要对其可靠性作出评价。不确定度是与测量结果联系在一起的一种参数,用来表示因测量误差的存在而对测量结果不能肯定的程度。任何测量结果都存在着不确定度,因此对一个测量结果来说,不仅要指出其测量值的大小,还要指出其测量结果的不确定度,以表示测量结果的可信赖程度。

1.3.1 不确定度的概念

不确定度是指被测量的真值以一定的概率落在某一量值范围的综合误差指标。测量不确定度的意思为测量结果的可疑程度,反映测量平均值附近的一个范围,真值以一定的概率落在其中。不确定度小,测量结果可信赖程度高;不确定度大,测量结果可信赖程度低。

不确定度与误差是有区别的。误差定义为测量值与真值之差,真值不可知,则误差也就无法知道。虽然通过估算,可以得到标准偏差等量,但它们并不能表示测量结果误差数值的大小,只是表示测量结果的不确定度。不确定度是可观测量,误差是不可观测量。

1.3.2 测量不确定度的分类

测量结果的不确定度一般包含若干分量,这些分量可按其数值的评定方法归并成 A、B 两类。

1. 不确定度 A 类分量 u_A (或 Δ_A)

A 类不确定度是指可以采用统计方法(具有随机误差性质)计算的不确定度,可用贝塞尔公式计算被测量的 A 类不确定度:

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

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,这种情况下,对测量误差的估计,就要在贝塞尔公式(式(1-4))的基础上再乘以一个因子。在相同条件下对同一被测量作 n 次测量,则计算 A 类不确定度可写成

$$u_A = \frac{t_p(n-1)}{\sqrt{n}} S \quad (1-5)$$

式中, $t_p(n-1)$ 是与测量次数 n 、置信概率 p 有关的量。大学物理实验中测量次数 n 一般不大于 10, 当 $5 < n \leq 10$ 时, 因子 $t_p(n-1)/\sqrt{n}$ 近似为 1, 误差并不很大, 这时式(1-5)可简化为

$$u_A \approx S \tag{1-6}$$

有关的计算还表明, 取式(1-6)作为 A 类不确定度可使真值落在 $\bar{x} \pm S$ 范围内的概率接近或大于 0.95, 所以我们可以这样简化: 直接把贝塞尔公式中的 S 值当做测量的总不确定度的 A 类分量。

当 $15 < n \leq 30$ 时, 因子 $t_p(n-1)/\sqrt{n}$ 近似为 $2/\sqrt{n}$, 这时式(1-5)可简化为

$$\Delta_A = u_A \approx \frac{2}{\sqrt{n}}S \tag{1-7}$$

当然, 测量次数不在上述范围或误差估算比较精确时, 可以再做深入分析。

2. 不确定度 B 类分量 u_B (或 Δ_B)

u_B (或 Δ_B) 是用非统计方法评定的不确定度的分量。一般情况下应根据经验或其他非统计方法估算。在测量中, 往往采用一些必要的措施, 使得系统误差减到最低程度, 或对系统误差进行修正, 这样我们可以只考虑测量仪器或者测量条件不符合要求而引起的附加误差所带来的 B 类分量。

由于在普通物理实验室中的多数仪器、仪表对同一被测量在相同条件下作出多次直接测量时, 测量的随机误差分量一般比其基本误差或示值误差限小不少; 另外一些仪器、仪表在实际使用中很难保证在相同条件下或正常条件下进行测量, 其测量误差除了基本误差或示值误差外, 还包含变差等其他分量, 因此本课程对 B 类分量的估计做如下简化: 依据实验条件、误差分布规律及经验由实验室给出。由不同情况 u_B 可取 $\frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}$ 、 $\frac{1}{3}\Delta_{\text{仪}}$ 及 $\Delta_{\text{仪}}$ 等。

仪器的误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 在仪器出厂时会在检定书或仪器中通过两种方式注明(表 1-1):

表 1-1 仪器误差限(正确使用仪器)

仪 器	$\Delta_{\text{仪}}$	备 注
米尺(最小刻度 1mm)	0.5mm	$\Delta_{\text{仪}}$ 要依据具体的实验条件及实验内容确定
游标卡尺(20 分度, 50 分度)	最小分度值(0.05mm, 0.02mm)	
螺旋测微计(0~50mm)	0.004mm	
物理天平(0.1g)	0.05g	
各类数字仪表	仪器最小读数	
分光计	最小分度值(1')	
电磁仪表(指针式)	$A \cdot K\%$	A 为量程, K 为等级

(1) 在仪器上直接标出或用准确度表示。如 50 分度的游标卡尺的分度值为 0.02mm, 其 $\Delta_{\text{仪}} = 0.02\text{mm}$ 。

(2) 给出仪器的准确度级别, 然后算出 $\Delta_{\text{仪}}$ 。如常用电学指针式仪表所用量程为 A , 准确度等级为 K , 则

$$\Delta_{\text{仪}} = A \cdot K\%$$

例如, 0.5 级毫安表的量程为 10mA 时, 仪器的误差限为

$$\Delta_{\text{仪}} = 10 \times 50\% = 0.05\text{mA}$$

若未注明仪器误差限或仪器误差限不清楚,则按如下规定:能连续读数的仪器(可对最小分度下一位进行估计),取最小分度的一半作为仪器的误差限,如米尺、螺旋测微计、读数显微镜等;不能连续读数或指针跳跃式移动的仪器,其最小分度为仪器误差限,如机械秒表、数字仪表等。

1.3.3 测量不确定度

测量不确定度是指由于误差的存在而对被测量量不能肯定的程度,是表征被测量的真值所在的量值范围的评定。

普通物理实验中,测量结果表示中测量不确定度既含有 A 类不确定度,又含有 B 类不确定度。为了正确反映测量不确定度,不能简单地将 u_A 和 u_B 代数相加,最合理的合成误差的方法是“方和根”合成法。

若两类不确定度分量为 u_A, u_B , 它们彼此独立,则测量结果的合成不确定度为 u

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (1-8)$$

相对不确定度为

$$E_r = \frac{u}{\bar{x}}$$

即相对不确定度等于测量不确定度除以测量平均值。

1.3.4 直接测量的不确定度

直接测量根据情况又分为单次直接测量和多次直接测量。由于单次直接测量不存在 A 类不确定度,不确定度 $u = u_B$ 。多次直接测量不确定度可用 $u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$ 估算。

例 1-1 用螺旋测微计测小球的直径,6 次测量值分别为 5.499mm, 5.500mm, 5.499mm, 5.498mm, 5.498mm, 5.499mm, 求其合成不确定度。

解 小球直径的算术平均值为

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^6 d_i / 6 = 5.49883\text{mm}$$

$$u_A = S(d) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (d_i - \bar{d})^2}{6-1}} = 0.00077\text{mm}$$

$$u_B = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3} = 0.004 / \sqrt{3} = 0.0023\text{mm}$$

所以

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.0024\text{mm}$$

1.3.5 间接测量的不确定度

在实验中,我们进行的测量多是间接测量。间接测量的结果是由直接测量结果根据一定的数学式计算出来的。由于直接测量有误差,它们必然通过函数关系传递给间接测量量,这就是误差的传递。间接测量的算术平均值与测量不确定度由直接测量结果通过函数式计算得出。

设间接测量量的函数式为

$$N = F(x, y, z, \dots)$$

其中, N 是间接测量结果, $x, y, z, \dots$ 是直接测量结果, 它们是相互独立的量。直接测量量的不确定度为 u_x, u_y, u_z ,

$$x = \bar{x} \pm u_x, \quad y = \bar{y} \pm u_y, \quad z = \bar{z} \pm u_z, \dots$$

则间接测量量 N 的算术平均值为

$$\bar{N} = F(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots)$$

由于不确定度都是微小量, 相当于数学中的“微变量”, 因此间接测量的不确定度的计算公式与数学中的全微分公式基本相同。考虑到不确定度合成的统计性质, 一般用“方、和、根”的方式进行合成。则间接测量量 N 的不确定度为

$$u_N = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2 u_z^2 + \dots} \quad (1-9)$$

间接测量量的相对不确定度为

$$E_r = \frac{u_N}{\bar{N}}$$

$$E_r = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln F}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial z}\right)^2 u_z^2 + \dots} \quad (1-10)$$

若间接测量量的函数式以和差运算为主, 则先计算 u_N 方便; 若以乘除运算为主, 则先计算 E_r 方便。

例 1-2 $N = x + y - z$ 为和差关系, $x = \bar{x} \pm u_x, y = \bar{y} \pm u_y, z = \bar{z} \pm u_z$ 。

解

$$\bar{N} = \bar{x} + \bar{y} - \bar{z}$$

$$u_N = \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial z}\right)^2 u_z^2}$$

所以

$$u_N = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$$

$$E_r = \frac{u_N}{\bar{N}}$$

例 1-3 $N = xy/z$ 为乘除关系, $x = \bar{x} \pm u_x, y = \bar{y} \pm u_y, z = \bar{z} \pm u_z$ 。

解 $\bar{N} = \bar{x}\bar{y}/\bar{z}$

对 $N = xy/z$ 两边取对数, 得

$$\ln N = \ln x + \ln y - \ln z$$

则

$$E_r = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln N}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial z}\right)^2 u_z^2}$$

最佳值或测量值未位与不确定度末位对齐, 即 $u_N = \bar{N} E_r$ 求取。

例 1-4 已知金属环的外径 $D_2 = (3.500 \pm 0.004) \text{ cm}$, 内径 $D_1 = (2.880 \pm 0.004) \text{ cm}$, 高度 $h = (2.575 \pm 0.004) \text{ cm}$, 求环的体积 V 及其不确定度 ΔV 。