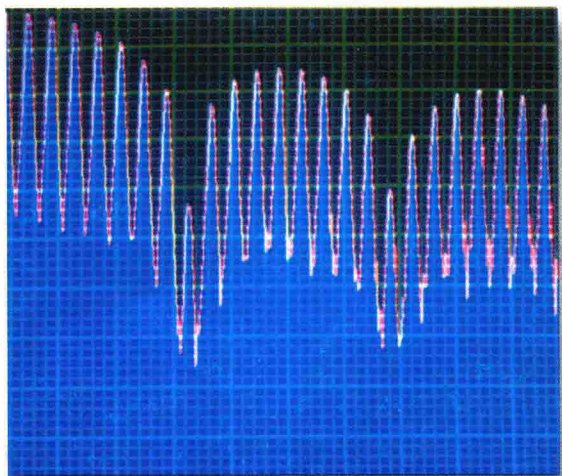


大 · 学 · 物 · 理 · 实 · 验



大学物理实验

赵丽华 倪涌舟 主编

浙江大學出版社

大学物理实验

主 编 赵丽华 倪涌舟
副主编 陈金根
主 审 田志伟

浙 江 大 学 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/赵丽华,倪涌舟主编. —杭州:浙江大学出版社,2001.1
ISBN 7-308-02624-8

I. 大... II. ①赵...②倪... III. 物理—实验—高等学校—教材 IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 82805 号

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

责任编辑 余健波

封面设计 张磊

经 销 浙江省新华书店

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 浙江上虞印刷厂印刷

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 16.5

字 数 400 千字

印 数 0001—8080

版 印 次 2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-308-02624-8/O·255

定 价 25.00 元

前 言

本书是按照原国家教委颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，结合浙江林学院大学物理实验课程讲义，整理编写而成的。

本书针对物理实验教学的要求和特点，把实验内容分成五个单元。其中第二单元介绍测量误差和数据处理的基本知识，并引入不确定概念，内容比《基本要求》略深，意在让学生从进大学开始就受到正规的实验训练，能严格按实验数据处理的正规要求去做，并贯穿整个物理实验教学过程。第三单元扼要地总结了物理实验的基本测量方法，介绍了误差等作用原则，为学生进行设计性实验打下一定的基础。然后把实验内容分为基础实验、综合实验和设计开放实验三个层次。基础性实验旨在积累实验知识和实验技能，培养良好的实验规范；综合实验则注重实验能力和思维能力的培养；设计与开放实验是学生在做了一定数量的基础实验以及在实验方法、仪器使用等方面有了一定的训练后，为了培养学生能独立自主地进行科学实验研究工作的能力而设置的，是实验教学的最高阶段。

本书在编写过程中力求做到：目的明确突出，使学生明确实验要求、完成预定任务；原理叙述准确清楚，对某些较深的内容，力求深入浅出，使学生在实验预习时能基本掌握理论依据；实验内容由详到简，旨在逐步提高学生的实验技能和动手能力，有些实验还安排了用不同方法来测量同一物理量，以适应不同专业及学有余力的学生需要；数据与结果由浅入深，在基础性实验中基本给出完整的数据记录及具体的误差分析方法，而在综合性实验中要求学生自拟表格，并进行实验的误差分析。每个实验前都附有一段提要，概述本实验的主要内容以及扩充有关知识面。每个实验后均列有思考题，供学生实验后分析讨论和巩固提高。另外，不另辟专章讲述实验仪器、物理量的单位和物理常数，而把它们融于相关的实验或附录中，使学生进入实验室后能很快独立地拟定合理的实验步骤，能正确使用仪器，在指定的时间内基本独立地完成实验。

通过以上各环节来培养学生在实验方法、实验技能、误差分析和总结报告等各方面的能力以及严谨的科研作风。

实验教材的编写离不开实验室的建设和发展，也离不开全体实验教师和实验技术人员的智慧和劳动。本书是一项集体的创作，是对过去的实验教学的总结和提高，也是开拓未来的起点。参加编写的有：周国泉（实验五、七、八、十二），陈金根（实验二十三、二十四、二十五、二十六、二十七、二十八），赵丽华（Ⅰ单元、Ⅱ单元、Ⅲ单元、实验一、二、三、四、六、九、十、十一、十二、十三、二十、二十一、二十二、二十一、三十二），倪涌舟（实验十六、十七、十八、十九、二十九、三十），曾松伟（实验十四、十五），由赵丽华、倪涌舟组织编写与统稿。另外，朱俏俊为

本书绘制了插图。

本书由浙江大学田志伟教授主审,所提的合理建议已纳入本书中。

本书不仅适用于农林院校本科专业,也适用于工科学校本科专业。

本书在出版过程中,得到了我校教务处和信息系领导的大力支持,在此表示衷心的感谢!

由于我们水平有限,真诚地欢迎教师、同学和读者给予批评和指正。

编 者

2000年11月

目 录

前 言

I 绪论	(1)
II 物理实验的基本知识	(4)
III 物理实验的基本测量方法	(26)
IV 基础实验	(33)
实验一 长度和固体密度的测量	(33)
实验二 金属杨氏弹性模量的测量	(41)
实验三 谐振动的研究	(46)
实验四 转动惯量的测定	(55)
实验五 测定液体的粘滞系数	(64)
实验六 液体表面张力系数的测定	(67)
实验七 测定空气的 γ 值	(73)
实验八 热的不良导体导热系数的测定	(77)
实验九 电表改装及校正	(81)
实验十 电桥法测电阻	(93)
实验十一 电位差计测量电动势	(99)
实验十二 热电偶的定标	(103)
实验十三 用霍尔元件测长直螺线管磁场	(106)
实验十四 模拟测绘静电场	(112)
实验十五 示波器的原理和使用	(116)
实验十六 光的等厚干涉	(126)
实验十七 分光计的调节和使用及用光栅测波长	(133)
实验十八 用分光计测三棱镜的折射率	(138)
V 综合与近代实验	(142)
实验十九 迈克尔逊干涉仪	(142)
实验二十 全息照相	(146)
实验二十一 声速测定	(152)
实验二十二 霍尔效应及应用	(156)
实验二十三 密立根油滴实验	(162)
实验二十四 扫描电子显微镜	(168)
实验二十五 核磁共振	(187)
实验二十六 真空的获得与测量	(193)
实验二十七 微波测量	(201)
实验二十八 X射线的在晶体中的衍射	(213)

VI 设计与开放实验.....	(221)
实验二十九 摄影技术.....	(221)
实验三十 暗房技术.....	(241)
实验三十一 梁的弯曲.....	(251)
实验三十二 分压与制流电路.....	(252)

I 绪 论

一、物理实验的地位和发展

实践是检验真理的惟一标准,在任何自然科学的发展中,实践都起到了举足轻重的作用。物理学作为一门研究客观世界物质运动最基本最普遍规律的学科,从其诞生时就与实践活动有着普遍和广泛的联系。综观物理学整个发展过程,可以说,精密、严谨的实验(实践)是物理学的根本。

早期的物理学是在人们长期的生产、生活实践中得以发展的。电磁学中的基本现象,如静电对微小物体的吸引;力学中的基本原理,如杠杆原理等物理现象的发现或物理规律的建立,都与人们的生产、生活实践有着千丝万缕的联系。但是由于当时客观条件的限制或者宗教哲学思想的束缚,在很长一段时间内,实践(实验)的作用未得到人们的认同。直至16世纪,意大利物理学家伽利略(Galileo Galilei, 1564—1642)首先摒弃了形而上学空洞的思辨,而以敏于观察、勤于实验为信仰,并把物理实验作为物理学系统理论的基础、依据和发展物理学必不可少的手段,从而使物理学走上了真正的科学道路。此后牛顿(Isaac Newton, 1642—1727)正是在伽利略等一批前期科学家的大量实验基础上创建了经典力学体系。从此任何一个物理学理论都与物理实验产生了紧密联系。

仅从电磁学的发展过程,我们就可看出物理实验对物理理论的重大推动作用。库仑(Charles Augustin Coulomb, 1736—1806)设计了扭秤实验,发现了电力的平方反比关系,从而建立了库仑定律。奥斯特(Hans Christian Oersted, 1777—1851)在一次课堂实验中的发现导致了电流磁效应的建立。安培(André Marie Ampère, 1775—1836)设计了载流导线之间的相互作用实验,建立了安培定律。而法拉第(M. Faraday, 1791—1867)更是通过10年的实验探索发现了电磁感应定律。麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1879)总结了前人的实验结果和理论,统一成完整的电磁场理论,并推断了电磁波的存在。但在当时他所认为的电磁波的存在只能算是一种假设,因为当时没有通过实验证明电磁波的存在。直至23年以后的1887年,赫兹(H. Hertz, 1857—1894)才完成了电磁波发射和接收实验,从而使麦克斯韦总结的经典电磁学理论得以最终确立。

随着物理学的发展,物理实验对物理理论的推动作用已得到了普遍的认同。大量的物理学家投身于物理实验的设计和研究,从而使得物理实验本身得到了长足的进步。测量技术、误差理论、计算机在实验中的应用,以及物理实验教学方法的不断发展,使得物理实验逐步成为一门可以独立于物理理论教学而存在的实验课程体系。它不仅可以加深学生对理论的理解,更重要的是可以使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和严格的训练,从而使学生掌握科学实验的主要过程和基本方法,同时也起到了培养学生的动手能力和科学思维能力的作用。

从物理实验的发展看,早在19世纪末,欧美各大学就建立了物理实验室,开始了物理实验教学和研究。我国也在1918年开始了物理实验教学。但物理实验作为高等院校一门独立

的基础课得到普遍的重视,则是近十几年的事。现在人们已越来越认识到物理实验是物理教学的一个重要组成部分,其作用不可替代。人们已开始重视实验教学内容的设计,教学方法和手段不断改进,实验仪器设计亦不断完善。现在我国的物理实验教学已逐步成为一门内容丰富、功能独特的课程。

二、物理实验的目的与任务

对于大学物理实验这样一门独立的基础课,编者除了从历史上的著名实验以及国内外高等院校的教学实验中认真学习、分析、挖掘、提炼出共同的带有普遍意义的思想和内容以外,还结合我校的特点和实验仪器的配备等具体情况编写成本教材。物理实验有其自己的理论,为了学习和叙述的方便,我们通过一个个相对独立自成体系又相互联系的实验构建起本教材的体系,以期达到如下的目的与任务:

1. 通过对物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习和掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能;懂得如何运用实验原理和方法去研究某个物理问题,加深对物理学原理的理解;熟悉常用仪器的基本原理、结构性能及使用方法。

2. 培养与提高学生的科学实验能力。主要有:

(1)自学能力:能够自行阅读实验教材,做好实验前的准备。对于实验中出现的基本问题,能够自己通过查阅资料而得到解决。

(2)动手能力:能够对实验仪器设备正确布局连接,借助教材或说明书正确使用仪器,具体测试,获得较准确的实验结果。能够掌握和运用基本的物理实验技能。

(3)分析能力:理论联系实际,能够对实验现象进行初步分析、判断和解释,用理论去指导实验。

(4)表达能力:能够正确记录和处理实验数据,绘制实验曲线,说明分析实验结果,撰写合格的实验报告。

(5)设计能力:对于简单问题,能够从研究对象或课题要求出发,自己阅读资料,依据某项原理设计实验方法,确定实验参数,选择配套仪器,拟定实验程序。

3. 培养与提高学生的科学实验素养。要求学生具有实事求是、理论联系实际的科学作风,严肃认真、不怕困难、艰苦努力的科学态度,不断探索、勇于创新的科学精神,以及遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品德。

三、怎样学好物理实验课

学好物理实验课的关键,在于把握以下三个基本环节:

1. 实验前的预习。实验教材是进行实验的指导书,在上实验课前都要认真阅读,弄清实验原理、方法和实验目的的要求;必要时还应阅读有关参考资料。对于所涉及的测量仪器,在预习时可阅读教材中有关对仪器的介绍,了解其构造原理、实验条件和操作规程等,预习是一次“思想实验”的练习,在此基础上写好预习报告。预习报告的内容主要包括以下几方面:(1)实验名称。(2)实验目的。(3)实验原理:简要概括出实验的理论依据;基本思想和方法,列出有关测量的计算式条件和将要被验证的规律,并指出实验公式中所含物理量的物理意义。(4)实验内容:绘出必要的电路图、光路图或设备示意图。其中要明确哪些物理量是直接测量量,哪些是间接测量量,用什么方法和测量仪器等,并拟定实验步骤。(5)在预习报告

上列出实验数据记录表格。

2. 实验的进行。实验时应遵守实验室规则;仔细阅读有关仪器使用的注意事项或仪器说明书;在教师指导下正确使用仪器,注意爱护、稳拿妥放、防止损坏;对电磁学实验,必须由指导教师检查电路的连接正确无误后,方可接通电源进行实验。

做好实验记录是实验的一项基本功。在观察、测量时,要做到正确读数,实事求是地记录客观现象和数据,并能正确反映测量仪器的精度。在编好页码的实验记录表上,写好实验名称、实验日期、同组学生,必要时还应注明天气、室温、湿度等环境条件;接着要记下实验所用的仪器名称、型号、规格、编号等。切勿将数据随意记录在草稿纸上,以免遗失。不应事后凭回忆“追记”数据,更不可为拼凑数据而将实验记录作随心所欲的涂改。

要逐步学会分析实验,排除实验中出现的各种较简单的故障,实验最后要进行数据处理。数据结果是否正确靠什么去判断?这主要靠分析实验本身来判断,实验后的讨论主要是发挥同学们才智、提高学生提出问题和解决问题的能力的一个重要环节,应努力去做。总之,在实验过程中不能过分地依赖教师,不论数据结果的好坏,都应逐步学会分析实验,找出成败的原因。

实验结束后,要把测得的数据交给指导老师签字认可,对不合理的或错误的实验结果,经分析后还要补做或重做,离开实验室前要整理好使用过的仪器,做好清洁工作。

3. 实验报告。实验报告是实验结果的文字报道,所以最起码应做到字迹清楚、文字通顺、图表正确、数据完备和结论明确。能给予同行或老师以清晰的思路、见解和新的启迪的报告才算得上是一份成功的实验报告。一般应写在专用的实验报告纸上,在预习报告的基础上,对原始的记录数据进行处理和分析,并以恰当的形式完整地表示出实验结果,扼要地写出实验结论。

实验报告应该按照自己的思路来写,特别受赞赏的是自身体会的经验之谈。

总之,物理实验课有着自己的特点和规律,要学好这门课不是一件容易的事情。希望同学们重视物理实验,并通过学习不断提高兴趣,打好基础,注意培养自己成为优秀的科学技术人才。

II 物理实验的基本知识

误差估计和数据处理是一门专门的科学,本章只简单介绍测量误差、不确定度的一些基本知识和数据处理的常用方法,作为进入实验前的基础准备。这些知识不仅在以后每次实验中要常用到,而且是今后从事科学实验工作所必须了解和掌握的。但是,由于这部分内容涉及面很广,不可能在二三次课中完全掌握,希望同学们课后再认真自学,做好课后练习,并且结合每一个具体实验再复习有关内容,通过反复运用逐步加以理解和掌握。

一、测量和误差的基本概念

1. 测量

物理实验中,往往要测出物理现象的各种物理量在变化过程中的数量关系。

所谓测量,就是把待测的物理量与一个被选作标准的同类物理量进行比较,以确定它是标准量的多少倍。这个标准量称为该物理量的单位,这个倍数称为待测量的数值。一个物理量必须由数值和单位组成,二者缺一不可。

按照中华人民共和国关于法定计量单位的规定,物理量单位均是以国际单位制(SI)为基础的,其中米(长度)、千克(质量)、秒(时间)、安培(电流强度)、开尔文(热力学温标)、摩尔(物质的量)和坎德拉(发光强度)是基本单位,其他物理量的单位可由这些基本单位导出,故称为导出单位。

本教材采用通用的国际单位制。在附录 I A 中列出了国际单位制的基本单位、辅助单位和具有专门名称的导出单位以及我国选定的非国际单位制的单位,供读者查阅。

2. 测量的分类

测量可分为直接测量和间接测量。

可以由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,用电压表测电压等都是直接测量,所得的物理量如长度、温度、电压等称为直接测量值。

在大多数情况下,需要借助一些函数关系由直接测量值计算出所要求的物理量,这样的测量称为间接测量。相应的物理量称为间接测量值。例如,欲测量一圆柱体的密度 ρ ,可通过测得圆柱体的质量 m 、直径 D 、高度 h ,通过公式 $\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi h D^2}$ 求出。公式中 m, D, h 为直接测量值,而 ρ 就是间接测量值。在误差分析的估算中,要注意直接测量值与间接测量值的区别。

3. 测量误差

在某一时空状态下,被测物理量所具有的客观实际值称为真值。一般来说,用数字表示它时,应是一个无穷多位的数。

测量是在一定条件下,使用一定的仪器,通过一定的方法,力图获得被测量的真值。但是由于测量仪器、测量条件、环境影响等因素的局限,使得测量所得值与客观真值之间总有一

定的差异。为了描述测量中这种客观存在的差异性,引进了误差的概念。

测量误差就是测量值与其客观真值之差。

测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差可以用绝对误差表示,也可用相对误差表示。

$$\text{绝对误差} = |\text{测量值} - \text{被测量值的真值}|$$

$$\text{相对误差 } E = \frac{\text{测量的绝对误差}}{\text{被测量值的真值}} \times 100\%$$

被测量值的真值是一理想概念,一般来说真值是不知道的。有时为了某种目的,可以用约定真值替代真值来求误差。所谓约定真值就是被认为非常接近真值的值,它们之间的差别可以忽略不计。无系统误差条件下的算术平均值、标准值、理论值、公认值等均可作为约定真值使用。但在许多情况下我们也得不到约定真值,这时上述误差定义便失去了实际意义,于是,人们建立起各种误差理论,用来科学地估算测量误差。

二、误差的分类及其处理方法

在实际测量中,由于产生误差的原因不同,误差的性质也不同,对不同性质的误差处理方法亦不同。通常将它们分为系统误差和随机误差(或称偶然误差)两大类。

1. 系统误差

系统误差一般具有确定性,即对同一被测量进行多次重复测量时误差的大小和符号(正或负)保持不变或有规律地变化。例如,某尺子刻度比标准标度偏大,那么用它测量物体长度时,测量值总是偏小,而且偏小的百分比每次都几乎一样,这就是由仪器标度不准造成的系统误差。

系统误差的来源有多种多样,从普通物理实验教学角度出发,大致可归纳为如下的方面:

(1)实验理论和实验方法不完善带来的误差,例如理论公式的近似性或实验条件达不到理论的要求。

(2)实验仪器不准确或使用不当造成的误差,例如,仪器本身存在某些缺陷,或没有在规定条件下使用仪器。

(3)环境条件有规律地变化所引起的误差,例如,温度、气流、电压的变化对测量结果带来一定影响。

(4)实验者的某些不足也会产生系统误差,例如,由于生理或心理的特点,有人估计读数时总是偏大或偏小。

对实验中的系统误差应如何处理呢?通常的做法是:首先需要对整个实验依据的原理、方法、测量步骤、所用仪器等可能引起误差的因素一一进行分析,查出产生系统误差的来源;其次通过改进实验方法和实验装置,校准仪器等方法对系统误差加以补偿、抵消;最后在数据处理中对测量结果进行理论上的修正,以消除或尽可能减少系统误差。但是发现和减小实验中的系统误差是一个困难任务,常取决于实验者的知识、经验和判断能力。这就要求初学者在平时每一个实验中对系统误差时刻保持警惕,并不断积累这方面的知识,逐步掌握处理系统误差的技能。

在本课程中,我们把处理系统误差的思想和方法结合到每个实验中进行讨论。比如在长

度测量实验中,对可定的零值误差进行修正;牛顿环实验中,用逐差法消除了中心难以确定和因附加光程差而引起的系统误差;惠斯登电桥实验中,用交换法减小和消除系统误差等等。希望同学们重视对系统误差的学习,并不断总结提高。

2. 随机误差

随机误差的特点是具有偶然性,即在同一条件下对同一被测量进行多次测量时,每次出现的误差大小和符号呈无规律的变化,亦称偶然误差。但经过足够多次的重复测量以后,随机误差的分布服从一定的统计规律。

随机误差主要由实验中各种因素以不可预知的方式产生的微小变动所引起。例如实验周围环境或操作条件的微小波动,测量对象的自身涨落,测量仪器指示数值的变动性,以及观测者本人在判断和估计读数上的变动性等,这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量的平均值发生有涨落的变化,这变化量就是各次测量的随机误差。可见,随机误差的来源是非常复杂且难以确定的。因而我们不能像处理系统误差那样去查出产生随机误差的原因,然后通过一定的方法予以修正或消除。这正像处理大量分子作无规则运动时,难以确定每个分子的具体运动规律,但大量的分子运动却表现出统计规律来一样,我们发现,就某一测量值的随机误差来说是没有规律的,其大小和方向都是不能预知的。但对某一量进行足够多次的测量,则会发现它们的随机误差服从正态分布(高斯分布)的统计规律,其特点如下:

- (1)有界性:绝对值很大的误差出现的机会为零。
- (2)单峰性:绝对值很小的误差比绝对值大的误差出现的机会多。
- (3)对称性:绝对值相等的正负误差出现的机会均等。
- (4)抵偿性:正负误差的代数和为零。

这一统计规律在数学上可用高斯误差分布函数来描述。

$$p(\delta x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\delta x)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中, $p(\delta x)$ 为概率密度函数,即误差值 δx 在其附近单位区间内出现的概率; $\delta x = x - x_0$ 为测量值的随机误差; σ 是高斯分布函数中的惟一参量,表示在一定条件下随机误差的分散程度。

高斯分布曲线如图 II-1 所示。横坐标表示误差值,纵坐标表示概率密度的大小。坐标原点相当于 $\delta x = 0$,对应着真值 x_0 的位置。曲线下的总面积表示各种可能误差值都出现的总概率,当然是 100%。由式(1)可计算出 $\pm\sigma$ 之间曲线下的面积为总面积的 68.3%,它表示随机误差在区间 $[-\sigma, \sigma]$ 内出现的概率为 68.3%,或者说测量值 x 在区间 $[x_0 - \sigma, x_0 + \sigma]$ 出现的次数占总测量次数的 68.3%。当总测量次数无限多时,它还表示被测量的真值包含在上述区间内的可能性是 68.3%。同样经计算得到,在区间 $[\pm 2\sigma]$ 内随机误差出现的概率为 95.4%。在区间 $[\pm 3\sigma]$ 内随机误差出现的概率为 99.7%,也就是说,随机误差超出这个范围的概率仅为 0.3%,而在一般的测量次数(10 次)中,几乎不可能出现这种情况,所以 3σ 称为极限误差。上述根据即是剔除具有粗大误差 $|\delta x| > 3\sigma$ 数据的拉依达准则。

σ 是高斯分布曲线拐点的横坐标,它的大小确定曲线的形状,如图 II-2 所示。对于某被测量 x ,实验条件不变时,用不同的测量方法和测量仪器会使随机误差的大小不同。 σ 大,表明随机误差分散程度大,测量的精密度低,曲线形状低而宽;反之,曲线形状高而窄。因而参量 σ 可以用来量度测量的精度。 σ 也称为标准偏差或均方根误差。

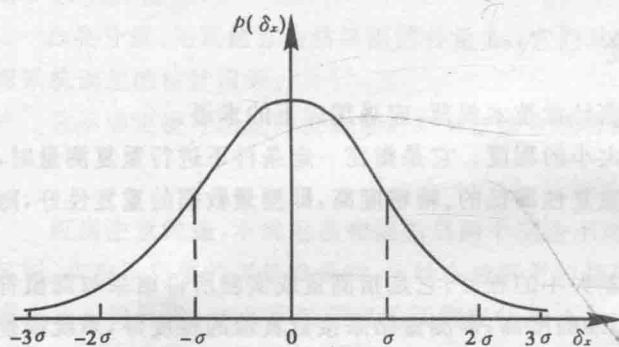


图 II-1 正态分布

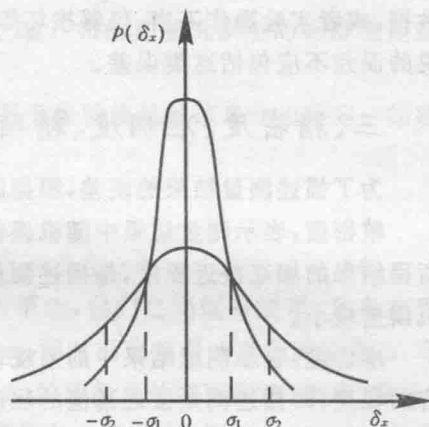


图 II-2 σ 值不同的两个正态分布

对测量中的随机误差如何处理呢？显然我们可以基于正态分布理论来进行。现设对某一物理量在测量条件相同的情况下，进行 n 次无明显系统误差的独立测量，测得 n 个测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ （往往称为一个测量列）。在测量不可避免地存在随机误差的情况下，处理这一测量列时必须回答下列两个问题：一是由于每次测量值各有差异，那么怎样的测量值是最接近于真值的最佳值？二是测量值的差异性即测量值的分散程度直接体现随机误差的大小，测量值越分散，测量的随机误差就越大，那么怎样对测量的随机误差作出估算才能表示出测量的精密度？在数理统计中，对此已有充分的研究，下面我们只引用它们的两个结论。

结论一：当系统误差已被消除时，测量值的算术平均值最接近被测量的真值，测量次数越多，接近程度越好（当 $n \rightarrow \infty$ 时，平均值趋近于真值），因此我们用平均值表示测量结果的最佳值。

算术平均值的计算式是

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

为了简洁，我们常略去求和号上的求和范围，例如上式可简写为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$$

结论二：一测量值的随机误差用标准偏差来估算。标准偏差计算公式为

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n-1}} \quad (3)$$

其中 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ ($i=1, 2, \dots, n$) 为每一次测量值 x_i 与平均值 $\bar{x}$ 之差，我们称为偏差。显然，这些偏差有正有负，有大有小，不能全面体现一列测量值的离散性。因此，常用“均方根”法对它们进行统计，于是得到上述标准偏差统计公式。而 S_x 与 σ 所定义的标准偏差是基本一致的。

值得指出的是，在多次测量时，正负随机误差常可以大致相消，因而用多次测量的算术平均值表示测量结果可以减小随机误差的影响。但多次重复测量不能消除或减小测量中的系统误差。

还有一种误差称为粗大误差，它是由实验者的失误造成的，如在记录和计算数据时写错

数据,或者实验操作不当、仪器损坏等。这是一种人为因素的误差,实验者必须避免它。我们说的误差不应包括这类误差。

三、精密度、准确度、精确度

为了描述测量结果的误差,根据国家计量技术规范,应采用以下的术语。

精密度:表示测量结果中随机误差大小的程度。它是指在一定条件下进行重复测量时,所得结果的相互接近程度,是描述测量重复性高低的。精密度高,即测量数据的重复性好,随机误差较小。

准确度:表示测量结果中的系统误差大小的程度。它是指测量或实验所得结果与真值符合的程度,即描述测量接近真值的程度。准确度高,即测量结果接近真值的程度好,系统误差较小。

精确度:表示测量结果中系统误差和随机误差的综合。它是指测量结果的重复性及接近真值的程度。对于实验和测量来说,精密度高,准确度不一定高;而准确度高,精密度也不一定高,只有精密度和准确度都高时,精确度高。

现在以打靶结果为例来形象说明三个“度”之间的区别。图 II-3 中,(a)图表示子弹相互之间比较靠近,但偏离靶心较远,即精密度高、准确度较差。(b)图表示子弹相互之间比较分散,但没有明显的固定偏向,故准确度高、而精密度较差;(c)图表示子弹相互之间比较集中,且都接近靶心,精密度和准确度都很好,亦即精确度高。

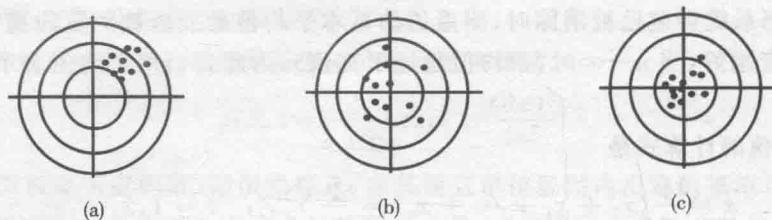


图 II-3 精密度、准确度、精确度之间的关系

四、不确定度和测量结果的表示

在对被测量的测量过程中,测量误差是普遍存在的,测量结果中包含有多种误差因素,如仪器误差、人员误差、环境误差、方法误差、调整误差、观测误差、读数误差等等。还要考虑到在很多情况下,人们对于各种误差的信息不能全面了解和掌握,特别是在那些多次重复测量中,不能充分反映出来的随机误差因素和未定系统误差。所有这些因素使得测量结果具有一定程度的不确定性。为了对测量结果的确定程度进行定量的估计,需要引入一个新的概念——不确定度。

根据国际计量局(BIPM)关于“实验不确定度的规定建议书 INC-1(1980)”的规定,采用不确定度来评价测量质量。我国国家计量总局给出的不确定度的定义是:表示由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度。它表示被测量的真值所处的量值范围的评定。

测量结果的总不确定度一般包含几个分量。按其数值评定方法,这些分量可归入两类:

A类分量:多次重复测量用统计方法计算出的分量 Δ_A 。如估算随机误差的标准偏差就属于A类分量。

B类分量:用其他方法估算出的分量 Δ_B ,它们只能基于经验或其他信息作出评定。如残留系统误差的估计值等。

总不确定度可用这两类分量的方和根法合成得到

$$\Delta = \sqrt{(\Delta_A)^2 + (\Delta_B)^2} \quad (4)$$

应当注意的是,不确定度和误差是两个完全不同的概念,它们之间既有联系,又有本质区别。在表示完整的测量结果时,应给出被测量的量值 x_0 ,同时标出测量的总不确定度 Δ ,写成 $x_0 \pm \Delta$ 的形式。这表示被测量的真值在 $(x_0 - \Delta, x_0 + \Delta)$ 的范围之外的可能性(概率)很小。物理量都有单位,不能不写出。因此,一个完整的测量结果包含三要素:量值 x_0 ,总不确定度 Δ 和单位。

五、直接测量结果总不确定度的估算和测量结果的表述

1. 仪器误差

测量是用仪器或量具进行的,有的仪器比较粗糙或灵敏度较低,有的仪器比较精确或灵敏度较高,但任何仪器,由于技术上的局限性,总存在误差。仪器误差是指在正确使用仪器的条件下,测量值和被测量的真值之间可能产生的最大误差。

仪器误差一般根据生产厂家仪器说明书所规定的示值误差或准确度等级来确定。例如:50分度的游标卡尺,测量范围在0—300 mm内,其分度值便是仪器的示值误差,因为确定游标卡尺上哪条线与主尺上某一刻度对齐,最多只可能有正负一条线之差。主副尺最小分度值之差为1/50 mm,其精度和示值误差均为0.02 mm。量程在0—100 mm内的千分尺,其副尺上的最小分度值为0.01 mm,而它的仪器的示值误差为0.04 mm。有的测量仪器并不直接给出仪器误差,而是以“准确度等级”来估计的。级值越小,则准确度越高。

一般的测量仪器上都有指示不同量值的刻线标记(刻度),相邻两刻线所代表的量值之差称为分度值,其最小分度标志着仪器的分辨能力。在设计仪器时,分度和表盘的设计总是与仪器的准确度相适应的。一般来说,仪器的准确度越高,刻度越细越密,但也有仪器的最小分度超过其准确度的。如水银温度计最小分度值为0.1℃,但其示值误差为0.2℃。如果手头缺乏有关仪器的技术资料,没有标明仪器的准确度,这时用仪器的最小分度值估算仪器误差是简单可行的办法。

2. 多次重复测量结果不确定度的估算和结果的表示

由于测量中存在随机误差,为了获得测量最佳值,并对结果作出正确评价,就需要对待测量进行多次重复测量。虽然测量次数增加时,能减少随机误差对测量结果的影响,但在普通物理实验中,考虑到测量仪器的准确度和测量方法、环境等因素的影响,对同一量作多次直接测量时,一般把测量次数 n 定在5—10次较为妥当。

如果测量次数 $n > 5$,就直接取 $\Delta_A = S_x$,标准偏差 S_x 和总不确定度中A类分量 Δ_A 是两个不同的概念,在普通物理实验中 $\Delta_A = S_x$,是一种最方便的简化处理方法,因为 Δ_B 可忽略不计,有 $\Delta = \Delta_A = S_x$,这时被测量的真值落在 $x_0 \pm S_x$ 范围内的可能性(概率)已大于或接近95%。也即被测量的真值在 $(x_0 - S_x, x_0 + S_x)$ 的范围之外的可能性(概率)很小(小于

5%)。

总不确定度中的B类分量 Δ_B 又如何确定?与总不确定度中A类分量 Δ_A 相比要困难一些,这需要靠实验者的经验、知识、判断能力以及对实验过程中所有有价值信息的把握和分析,然后合理地估算出B类分量 Δ_B 。但对于一般的教学实验,测量中系统误差已基本修正或消除或减小到最低限度,残留的系统误差比起其他误差来往往往又可以忽略不计。这时我们也作一个简化了的约定,即 $\Delta_B=\Delta_q$ (Δ_q 为仪器误差),于是由(4)式可得多次重复测量结果总不确定度 Δ_x 的计算公式:

$$\Delta_x = \sqrt{S_x^2 + \Delta_q^2} \quad (5)$$

我们通过以上对多次重复测量的结果不确定度的估算,可以把测量结果(修正了系统误差以后)写成如下形式:

$$x = \bar{x} \pm \Delta_x \quad (6)$$

式中, x 为测量值; $\bar{x}$ 是多次测量数据的算术平均值(即测量的最佳值), Δ_x 一般取一位有效数, $\bar{x}$ 的最后一位取至与 Δ_x 一位有效数字对齐。必要时,还需给出测量值的相对误差。

$$E_x = \frac{\Delta_x}{\bar{x}} \times 100\%, \quad (7)$$

$$E_0 = \frac{|\bar{x} - x_0|}{x_0} \times 100\% \quad (8)$$

x_0 为测量值 x 的公认值或理论值。

3. 单次测量结果总不确定度的估算和结果表示

对于实际测量,有的测量不能或不需要重复多次测量,或者仪器精度不高,测量条件比较稳定,多次重复测量同一物理量的结果相近。例如用准确度等级为2.5级的万用表去测量某一电流,经多次重复测量,几乎都得到相同的结果。这是由于仪器的精度较低,一些偶然的未控因素引起的误差很小,仪器不能反映出这种微小的起伏。因而,在这种情况下,我们只需要进行单次测量。

如何确定单次测量结果的总不确定度呢?显然我们不能用(4)式算出单次测量的A类分量 Δ_A 。尽管 Δ_A 依然存在,但在单次测量的情况下,往往是 Δ_q 要比 Δ_A 大得多。按照微小误差原则,即只要 $\Delta_A < \Delta_B/3$ (或 $S_x < \Delta_q/3$),在计算总不确定度时,就可以忽略 Δ_A 对总不确定度的影响,所以,对单次测量,总不确定度可简单地用仪器误差 Δ_q 来表示。

值得注意的是:单次测量对总不确定度取 Δ_q 的值,并不说明单次测量比多次测量时的总不确定度要小,而只是说明用 Δ_q 和用 $\sqrt{S_x^2 + \Delta_q^2}$ 式估算出的结果相差不大。

我们在表示单次测量的结果时,一般将按仪器出厂检定书或仪器上注明的仪器误差 Δ_q 作为单次测量的误差;如果没有注明,也可按仪器最小刻度的一半作为单次测量的误差。单次测量的结果可表示为

$$x = x_m \pm \Delta_q (\text{单位}) \quad (9)$$

或

$$x = x_m \pm \text{仪器最小刻度}/2 (\text{单位}) \quad (10)$$

其中 x_m 是单次测量值,也称单次测量最佳值。

下面举例说明直接测量的计算结果及表示。