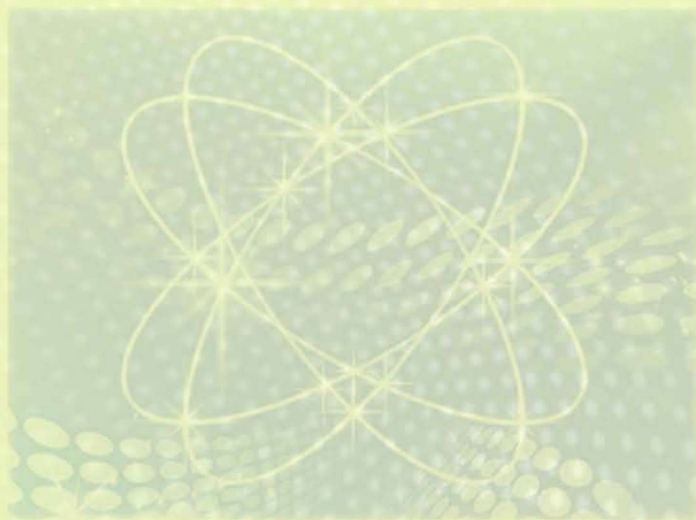


普通物理实验

刘芬 王爱芳 主编



中国海洋大学出版社

普通物理实验

主 编 刘 芬 王爱芳
副主编 杨田林 吕英波 丛伟艳
编 者 宋淑梅 尹红星 孙明哲
刘维新 邢赞扬 李 勃
张 江

中国海洋大学出版社

· 青 岛 ·

图书在版编目(CIP)数据

普通物理实验 / 刘芬, 王爱芳主编. —青岛: 中国海洋大学出版社, 2015. 8

ISBN 978-7-5670-0955-4

I. ①普… II. ①刘… ②王… III. ①普通物理学—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 188334 号

出版发行 中国海洋大学出版社
社 址 青岛市香港东路 23 号 邮政编码 266071
出 版 人 杨立敏
网 址 <http://www2.ouc.edu.cn/cbs>
电子信箱 coupljz@126.com
订购电话 0532-85902573(传真)
责任编辑 李建筑 电 话 0532-85902505
印 制 文登市印刷厂有限公司
版 次 2015 年 8 月第 1 版
印 次 2015 年 8 月第 1 次印刷
成品尺寸 185 mm×260 mm
印 张 16
字 数 370 千
定 价 25.80 元

前 言

普通物理实验是理工科专业学生进入大学后接触的第一门独立开设的基础实验课程,通过对本课程的学习可以掌握基本的实验方法和操作技能,在观察、测量与分析中,加深对物理学的认识,同时能够领会物理学家的物理思想和实验设计方法,为今后探索专业问题奠定一定的基础。

在参考其他普通物理实验教材的基础上,我们根据实验室的实际状况,结合仪器说明书,编写了本书。全书共分四个部分,第一部分为数据处理及误差理论,第二部分为力学和热学实验,第三部分为电磁学实验,第四部分为光学实验。为了更好地适应物理实验教学,本版在前一版的基础上进行了修订,删去了个别实验内容也增加了部分新的实验项目。

本书由物理实验中心多名从事实验教学的教师集体编写而成。杨田林老师负责教材的整体规划,刘芬老师负责全书的统稿,王爱芳老师和刘芬老师审阅和校对了全书。王爱芳、杨田林老师编写了第一部分,刘芬作了修订。王爱芳、杨田林、付辉编写了第二部分,王爱芳、尹红星、宋淑梅、张江、邢赞扬、杜桂强作了修订。丛伟艳、胡绍明、王爱芳、杨田林、刘芬编写了第三部分,丛伟艳、刘芬作了修订。吕英波、王爱芳编写了第四部分,王爱芳、孙明哲、刘维新、尹红星、李勃、宋淑梅作了修订。在本书编写过程中,学院的领导和老师们都给予了大力支持,在此表示感谢。

由于编者的水平及经验有限,书中难免存在一些缺点或错误,希望从事物理实验教学的老师和使用本书的读者提出宝贵意见或建议,以便我们在下次修订时更正。

编者

2015年6月

目 次

绪 论

第一节	实验在物理学中的地位	1
第二节	物理实验课的教学目的和任务	2
第三节	实验课进行的过程与要求	3
第四节	实验报告的书写格式与要求	4

第一部分 误差理论与数据处理

第一节	测量及其分类	5
第二节	误差的分类与表示法	6
第三节	随机误差的估算	9
第四节	系统误差的处理	13
第五节	测量结果的评定	14
第六节	有效数字及其运算	19
第七节	实验数据处理的常用方法	22
习 题		31
讨论题		34

第二部分 力学、热学实验

实验一	测长仪器的使用	35
实验二	示波器的原理和使用	40
实验三	三线扭摆法测转动惯量	49
实验四	恒力矩转动法测刚体转动惯量	52
实验五	拉脱法测量液体表面张力系数	59
实验六	空气比热容比测定	62
实验七	弦线上波的传播规律研究	65
实验八	声速的测量	68
实验九	弯曲法测杨氏模量	73
实验十	用动态法测定杨氏模量	78
实验十一	固体线胀系数的测定	84
实验十二	耦合摆的研究	87
实验十三	混合法测量液体比汽化热	91

实验十四	旋转液体特性研究	95
实验十五	用波尔共振仪研究受迫振动	100

第三部分 电磁学实验

实验一	密立根油滴实验——电子电荷的测量	108
实验二	铈化铟磁电阻传感器特性的测量	115
实验三	直流电位差计的原理与使用	119
实验四	用单桥和双桥法测电阻	122
实验五	霍尔效应及其应用	127
实验六	霍尔法测螺线管轴向磁场分布	134
实验七	电表的改装和校准	139
实验八	动态磁滞回线实验研究	142
实验九	电子射线的电偏转及其灵敏度的测定	149
实验十	电子射线的磁聚焦和电子荷质比的测定	154
实验十一	RLC 串联交流电路的研究	159
实验十二	RLC 电路的暂态过程	161
实验十三	超声波的多普勒效应综合实验	166
实验十四	夫兰克——赫兹实验	171
实验十五	PN 结正向压降与温度关系的研究	177

第四部分 光学实验

实验一	薄透镜焦距的测量	182
实验二	光通信实验研究	185
实验三	等厚干涉	190
实验四	光敏电阻特性研究	195
实验五	光的衍射	201
实验六	光偏振现象的研究	206
实验七	用旋光仪测糖溶液的浓度	211
实验八	迈克尔逊干涉仪	216
实验九	固体介质折射率的测定	223
实验十	硅光电池特性研究	225
实验十一	分光计的调整及使用	231
实验十二	三棱镜顶角和折射率的测量	237
实验十三	用透射光栅测定光波波长	240
附录	244
参考文献	250

绪 论

第一节 实验在物理学中的地位

物理学是一门实验科学。实验是在人工控制的条件下使现象反复重演并进行观测研究,在实验中常把复杂的条件加以简化,突出主要因素,降低或排除次要因素的作用,以便得到比较准确的观测结果。从现代科学的观点来看,实验是研究自然规律与改造客观世界的基本手段。

第一,物理学是在实验基础上发展起来的,离开物理实验,物理学的发展就无从谈起。从某种程度上说物理学从包罗万象的自然哲学中分离出来,其基本标志就是实验方法的引入。伽利略的实验研究,尤其是他把实验方法和数学方法结合起来研究物理规律,使物理学开始走上真正的科学道路。而实验手段的不断完善和发展又为物理学最终形成自然科学中的一个独立学科奠定了坚实的基础。实验方法的使用不仅促进了物理学的产生而且是物理学发展的动力。物理学的每一次重大进展都离不开实验的推动。正是 19 世纪末,黑体辐射、光电效应、原子光谱等实验的结论接二连三地向经典物理学提出挑战,导致了经典理论的危机,特别是放射性和 X 射线的发现和研究,有力地冲击了原子不可分、质量不可变的传统物质观念,动摇了经典力学和经典物理学的神圣地位,最终导致了近代物理学的诞生。

第二,物理学理论的正确与否,归根结底必须用实验检验。在物理学研究中,为了寻找事物的规律,对某些现象的本质会提出一些说明方案和逻辑推演,这些理论探索还不能视为定论只能称之为假说。只有经过不断的实验检验,证明是正确的假说才能上升为物理学定律。物理定律一般是指实验定律,是实验事实的总结。物理学发展过程中,许多关键问题最后都要诉诸实验。例如,托马斯·杨的双缝干涉实验证实了光的波动说;赫兹的电磁波实验证实了麦克斯韦的电磁场理论;密立根所做的光电效应实验证实了爱因斯坦的光量子假说。

第三,实验和理论的对立统一是物理学发展的根本动力。在科学进步日新月异、各种学说层出不穷的今天,现有理论体系之间的矛盾固然可以成为建立新理论的突破口,但是,实验结果仍然对理论研究具有直接的指导作用。首先,现有的理论体系是建立在大量实验基础上的,要纠正、推翻现有理论就必须对它的实验过程、方法和结果进行认真的考察。其次,新理论往往是受到新的实验结果的启发而提出来的。物理学发展的历史表明,从来就没有一个真正有用和深入的理论是由纯粹思辨而发现的。以高度抽象的相对论而言,狭义相对论固然主要是着眼于力学和电动力学之间关于运动相对性的不对称,但也不能忽视光行差现象和斐索实验给爱因斯坦的启迪。广义相对论虽然是基于将相对性原理贯彻到底的信念,但等效原理的提出显然是受到了厄缶实验的启示。无数事实证明,物理

学各个领域的进步无一不是理论和实验结合的产物。

第四,实验是理论付诸应用的桥梁。人类认识自然界的目的是为了改造自然,理论研究的价值就在于它能被用来指导实践。然而,物理理论尤其是现代物理理论能够直接转换为生产技术应用于生产领域的情况还很少见。例如,热核巨变可以产生巨大的能量,这在理论上已没有多大问题,但至今这种能量还没有得到开发利用,要使它产生应有的经济效益,还必须经过大量的实验研究。所以,任何一种新技术、新材料、新产品的产生都要经过大量的实验才能获得。原子能、半导体、激光等科技成果,不仅其理论的提出来源于实验事实的总结,而且它的产生、开发、应用都离不开实验室。因此,实验是物理科学用于其他学科和生产领域的必由之路,是物理学转化为生产力的桥梁。

物理学的发展史是理论和实验相辅相成的历史。作为培养高级工程技术人员的高等院校,要使学生不仅具有深广的基础理论知识,而且要有从事现代化科学实验的较强能力以适应将来工作的需要。

第二节 物理实验课的教学目的和任务

物理学教科书上的理论都是经过抽象概括、公式化表述出来的。理论产生的经过一般不作介绍,这样的教学内容很容易使学生认为这些定律、理论是纯数学推导出来的或者是唾手可得的,从而认识不到实验的重要意义,丧失观察实验的兴趣,不利于培养学生观察问题、提出问题、分析问题和解决问题的能力。因此,加强实验教学是学生学好物理学重要的一环。

普通物理实验课是理科各专业的一门必修课,是学生在大学四年中受到系统实验技能训练的开端。物理实验的理论、方法、手段是所有实验中最基本、最普遍的理论、方法和手段,是其他专业实验的基础。因此对于大学理科学学生来说,物理实验技能的培养是不可少的。

总体而言,实验的任务主要包括以下三方面,第一,选用合适的仪器,采用正确的测量和运算方法,将测量误差减至最小;第二,在测量条件下,求出被测量的最近真值;第三,估算最近真值的可靠程度,即估算近真值的不确定度并科学表达出来,没有给出不确定度的实验结果是无价值的。围绕实验的任务,普通物理实验课的教学目标是:

(1)学习和掌握如何运用实验原理和方法去研究某些物理现象并进行具体测试,主要是训练学生具有一定的运用测试手段的技能。

(2)熟悉常用仪器的基本原理、结构性能、调整操作、观察和故障排除,着重训练学生操作、调整实验仪器的基本技能。

(3)培养学生如何从测量目的出发,依据适用的原理、方法,利用合适的仪器,确定合理的实验程序。

(4)测量、读取并记录数据。

(5)处理数据,分析结果。

(6)写出实验报告或论文。

在培养学生掌握这些专门知识和技能、提高科学实验素养的同时,培养学生理论联系

实际、实事求是的科学作风,严肃认真的工作学习态度以及主动钻研和探索未知世界的创新精神。

第三节 实验课进行的过程与要求

无论做什么科学实验,大体经历以下过程:

- (1)实验任务的提出。
- (2)实验的构思与设计。
- (3)实验仪器的安装调试。
- (4)测量、读取并记录数据。
- (5)处理数据,分析结果。
- (6)写出实验报告或论文。

实验课的进行大体也是如此,只是所做的实验不是开创性的实验,而大多是重复前人的成功实验。学生主要是通过教师的指导,亲自动手学习实验技能,重点不是追求成果和发明,而是通过严格训练提高各方面的能力。

在每一次实验课中,应重视以下几个学习环节:

(1)课前预习。为保证做好实验,每次实验课前都要仔细阅读此次实验的教材和有关资料,弄清学习要求、实验原理,明确实验条件和实验的主要步骤、测量方法及注意事项等。并根据实验内容,画好记录数据的表格,准备好实验中所需自备的纸、笔、尺等工具。

(2)认真听讲。进入实验室后,要认真听指导教师有关实验的原理、仪器的使用、应掌握的重点和注意的问题等方面的讲授,尤其要注意听指导教师所讲的自己在预习中没有弄懂或书上没有介绍的内容以及有关仪器的调试技巧和人身安全等方面的特殊规定。

总之,通过预习和听讲,于实验开始前,在脑子里较清楚地形成如何进行此次实验的大体轮廓,做到心中有数。带着问题和办法进行实验,会收到良好的效果。

(3)仔细操作。实验开始前应检查核对实验仪器,如有缺少或损坏,及时向指导教师提出,不允许擅动其他组的仪器。

实验操作过程是整个实验的核心,正确布置和调试仪器是实验成败的关键。一般调试需占整个实验的大部分时间,所以同学们要有耐心,像科学工作者那样认真对待调试中的每一步。调试中遇到仪器有故障,要在指导教师的指导下排除,并把遇到问题看成是学习的好机会,直至将仪器调到最佳状态为止。同学们在记录数据时,要如实记录从仪器上直接读出的原始数据,不应是经过计算后的数据。也不能为了得到一个好的测量结果,而随便更改不符合已知结果的某些数据,更不能为了结果而凑数据。

(4)做好善后。做完实验后,数据记录要经过指导教师审阅,以免发生有大的数据错误或漏测数据的情况。数据记录和实验仪器设备经指导教师检查无误后,关好仪器电源,整理仪器并恢复原位,打扫实验室卫生,待指导教师签字后,才可离开实验室。

(5)写出完整的实验报告。这一步一般应在课后完成,下周交上实验报告。

第四节 实验报告的书写格式与要求

实验报告是对自己实验工作的一个总结。写实验报告是整个实验的一部分,是对实验内容、实验原理深入理解的过程。写好实验报告也是为将来进行科学研究、写科学论文打好基础。实验报告要求使用本校印刷的实验报告纸来写,文字叙述要简练,字迹要清晰整洁,作图要规范,数据表格要齐全。

实验报告包括以下几方面内容:

(1)院、系、年级、姓名、学号、组别、同组者、日期。

(2)学科名称、实验题目。

(3)实验目的。

(4)实验仪器。

(5)实验原理(包括实验的理论根据、重要的公式及实验原理示意图等)。

(6)实验内容。可简述实验过程中的几大步骤和实验项目。

(7)数据记录列表。将原始数据整理后重新在报告中列表,间接测量结果和最终计算结果也可记录在表中。指导教师签字的原始数据记录要附在报告后面交上。

(8)数据处理。将测得数据按实验内容要求进行运算,求出最终结果和误差。数据处理中要注意有效数字和单位。在表达实验结果时,一般包括不可分割的三部分,即结果的测量值 \bar{x} 、绝对不确定度 U 和相对不确定度 E ,综合起来可表示为

$$x = \bar{x} \pm U(\text{单位})$$

$$E_x = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\%$$

如果实验是观察某一物理现象或验证某一物理规律,则只需扼要地写出实验结论。

(9)思考题的讨论。根据实验过程中所观察的现象,特别是异常现象,以及实验结果,讨论分析此实验内容中所给出的思考题。也可提出自己的疑问和见解,特别是对实验的改进建议,这些最能反映同学们观察和分析问题的能力。

第一部分 误差理论与数据处理

第一节 测量及其分类

一、测量与国际单位制

物理实验的目的就是要定性地观察、定量地测量有关的物理量,通过对测量数据的误差分析和数据处理,揭示和探索自然界物质和现象的本质,以便更真实合理地掌握自然界物质和现象的内部规律性。因此,测量是人类认识自然界的最基本的手段。

所谓测量,就是一种把待测量和代表标准计量单位的量具作比较的过程。经过比较得出待测量相当于计量单位的多少倍,这个倍数值称为读数。读数加上单位就称为测量数据。一个数值只有加上单位才有具体的物理意义,如 4.85 是一个数值,若加上单位“米”便成了一个表示长度的数据 4.85 米;若加上单位“秒”就成了一个表示时间的数据 4.85 秒。所以在一个测量数据中,数值和单位两者都不可缺。

七个基本国际单位:长度为米,质量为千克,时间为秒,温度为开尔文,物质的量为摩尔,电流为安培,发光强度为坎德拉。

二、测量的分类

物理实验的过程就是测量各种物理量的过程。根据所获得数据的方法不同,测量可分为直接测量和间接测量两类。按测量条件的不同,这两类测量又都有等精度测量和非等精度测量之分。

1. 直接测量和间接测量

直接测量是指在测量中用标准量具或仪表直接读数获得数据。如用米尺测量金属丝的长度、用秒表测量复摆周期、用温度计测量温度等等,都属直接测量,可见直接测量是最基本的量度。

对于无法用标准量具和仪器直接读出数据的物理量,可以找出与这些物理量有函数关系的某些可直接测量的量,待测出直接测量值后,通过函数关系计算间接得出结果,这种测量称间接测量。例如,要测量某物体的运动速度 v ,只有直接测量出该物体移动的距离 s 和所用时间 t ,才能用公式 $v=s/t$ 算出速度。所以对 s 和 t 的测量是直接测量,其值为直接测量值;对 v 的测量是间接测量,其值为间接测量值。在实验中,除直接测量外,大多数间接测量的内容、实验原理、方法、步骤、数据处理等大都与直接测量有关。但要注意,区分直接和间接测量与单位制中的基本量和导出量没有直接联系。

2. 等精度测量和非等精度测量

等精度测量是指在测量过程中,影响测量值的诸多因素都是一样的,即在相同的条件

下进行的测量。例如,同一个人在同一台仪器上采用同样的测量方法对同一物理量进行多次测量,每次测量的环境条件都一样,可信程度都相同,这种测量就是等精度测量,这一系列测量值称为等精度测量列。

非等精度测量是指在对同一物理量的测量中,采用了不同的仪器,不同的方法,或由不同的人测量了不同的次数,即测量的条件完全不同或部分不同,那么每个测量结果的可信程度也就不相同。测量所得的一组数据,称为非等精度测量列。以后的误差理论分析中,将分别讨论这些不同测量的处理方法。

第二节 误差的分类与表示法

一、误差的基本概念

1. 绝对误差

测量误差可简称为误差,即测量结果减去被测量的真值。记某被测量 X 的测得值为 x , 其真值为 x_0 , 则误差 Δx 为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-2-1)$$

上述误差与被测量的单位相同,所以也称为绝对误差。

2. 相对误差

在相同的测量中,用绝对误差或相对误差评价测量结果的优劣都是可行的,但是在具有可比性的不同测量中,只有采用相对误差才能进行合理评价。如表 1-2-1 所示。显而易见,相对误差能更好地反映测量结果的好坏,所以引入相对误差 E 。

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

表 1-2-1

测量值	绝对误差	相对误差
1 m	2 mm	$E=0.2\%$
100 m	5 cm	$E=0.05\%$

测量工具、人员等相同的情况下,对两个长度的测量情况见表 1-2-1。比较两次测量的相对误差值可以知道,第二次测量较第一次测量准确。

3. 真值

由于真值是一个客观的理想概念,一般不可能准确知道,所以绝对误差将无法计算,因此有必要对真值的概念作以下的变通和规定,以便计算绝对误差。

(1)理论真值。理想条件下的理论导出值可以作为真值。例如,三角形的内角之和为 180° ;理想的 LC 回路中电压与电流位相差为 90° 。

(2)约定真值。公认的一些常数,如阿伏伽德罗常数 $6.022\ 136\ 7 \times 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$ 等。

(3)相对真值。用精确度高一个数量级的仪器校准的值可看作相对真值。

(4)近真值。多次测量量的算术平均值,可视为真值的最佳近似值。即

$$x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x} \quad (1-2-3)$$

可以证明,在理想条件下当 $n \rightarrow \infty$ 时,测量值的算术平均值即为真值。即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = x_0 \quad (1-2-4)$$

二、误差的分类

误差产生的原因很多,且性质也不相同,概括起来可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。在实际测量中,这三类误差常常是混在一起的。下面分别讨论其产生原因和规律。

1. 系统误差

在相同条件下多次测量同一物理量时,测量结果的误差总是偏向一个方向或按一定规律变化,这类误差称为系统误差。

系统误差产生的原因有以下几方面:

(1) 仪器误差,指所用量具和装置本身固有的误差。如螺旋测微器因长期使用磨损而使零刻度不能对准,不测量时电表指针不在零值,天平的两臂不等及仪器的准确度、灵敏度、最小分度值不标准,从而使得每次测量结果都存在一定规律的偏离。

(2) 理论误差,指所依据的实验理论、实验方法或理论公式本身存有近似性,或忽略了一些在测量过程中实际在起作用的因素而产生的误差。

(3) 环境误差,指因为周围环境因素对测量的影响而产生的误差。如地心引力、机械振动、电场、磁场、大气压和空气的温湿度都可能对实验装置产生不同程度的影响。

(4) 人员误差,指由于测量者感觉器官的分辨能力差或反应不灵敏,有习惯性不当操作或实验技术水平不高等因素而引起的观测误差。如测长度时,脑袋习惯歪向一边,眼睛总是斜对量具刻度;使用秒表时反应总是滞后,以致数据总比真值大。

对于因器具不准引起的系统误差,只要在使用前对其进行校正处理便可基本消除。如螺旋测微器,游标尺及电流表、控温仪等一切指针式表头,测量前应注意校正其零点。

2. 随机误差

随机误差(也称偶然误差)是指在测量过程中,因存在许多不可预测的随机因素的影响使测量值带有大小和方向都难以预测的测量误差。如测量时待测物与量具对得不准,平衡点确定得不准,读数不准确,实验仪器由于环境、温度、湿度、电源电压的起伏不稳而产生诸多微小量度的变化及实验室地面的微振动等。虽然这些因素的影响是很微小的,但是经常混杂出现,没有规律,无法控制,因而难以确定是哪种因素在影响着测量结果,也就不可能像对待系统误差那样较易找出原因加以排除。但随机误差并非毫无规律,它的规律性是在大量的测量数据中显现出来的一种统计规律。在实验中,对同一条件下的同一物理量进行大量重复测量,在极力排除和改正一切明显的有规律的偏差之后,其测量误差会表现出以下

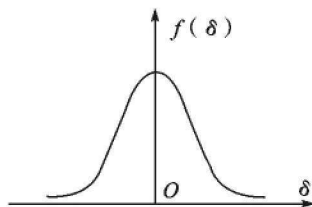


图 1-2-1 随机误差正态分布曲线

规律性,如图 1-2-1 所示:

(1)对称性。绝对值相等的正、负误差出现的概率相同,即当测量次数 n 相当大时,绝对值相等、符号相反的随机误差出现的机会相同。

(2)有界性。绝对值很大的误差出现的概率为零,即在一定的条件下,随机误差的绝对值不会超过某一界限。

(3)单峰性。绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大,并在真值附近形成一个集中密集区,且只有一个密集区。

(4)抵偿性。随着测量次数 n 的增加,随机误差 δ_i 的代数和趋于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0$$

实际上抵偿性也可由单峰性及对称性所确定。抵偿性是随机误差最本质的统计特性,一般来讲,凡是具有抵偿性的误差,原则上都可按随机误差处理。

3. 粗大误差

粗大误差是指明显偏离大多数测量值的误差,产生粗大误差的原因主要是操作上的错误或粗心读错数据。如游标尺与待测物之间没卡紧、歪斜,或使用测长显微镜忽视了螺距差的影响,读数就会有较大的误差。对这种反常的粗大误差,仔细判断确信是由操作错误或粗心造成的应舍掉。如果不是因操作错误或粗心造成的,就应如实记录下来,待数据处理时按统计原则进行处理。

三、测量的精密度、准确度和精确度

误差理论中,为定性地描述测量结果与其真值的接近程度常引用“精确度”这个概念,精确度概念中包括“精密度”和“准确度”两层含义。为形象表述它们,以打靶时弹着点的情况为例说明。

图 1-2-2 表示打靶时的三种弹着点情况。若把靶子的中心比喻为待测物的真值,则不同的弹着点情况就表示测量时测量值在真值周围不同的分布情况。我们应该如何评价射击(测量)的质量呢?

精密度、准确度和精确度都是用来评价测量结果好坏的,但这三个词的含义不同,使用时应加以区别。

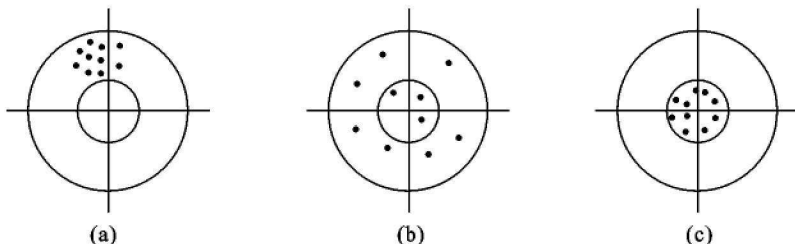


图 1-2-2

(1)测量结果的精密度高,通常是指测量数据比较集中,多次测量重复性好,表示随机误差小,但系统误差不一定没有。如图 1-2-2(a)所示的情况就表示弹着点在一个区域内

比较密集,但都离中心有一距离。

(2)测量结果的准确度高,是指测量数据的平均值偏离真值较少,测量结果的系统误差小,但数据的分散情况,即随机误差的大小不明确。如图 1-2-2(b)所示,射击的准确度高,但精密度较差,即系统误差小,随机误差大。

(3)测量结果的精确度高,是指测量数据比较集中在真值附近,即测量的系统误差和随机误差都比较小。所以,精确度是对测量结果的随机误差和系统误差的综合评定。图 1-2-2(c)表示精密度和准确度高,即精确度高。

综上所述,不难看出精密度是用来定量描述测量数据的随机误差或数据离散程度的。准确度是用来定量描述测量数据的系统误差或数据平均偏离真值程度的。精密度和准确度都只能从单方面去评价测量质量的好坏,精确度才是对两方面的综合评价。

第三节 随机误差的估算

对随机误差的研究,是误差理论的一个重要部分,它的产生和处理符合统计规律,属于国际计量委员会所定义的两类不确定度中的 A 类,即用统计方法计算的那些分量,是一个比较复杂的课题。在此只简单介绍随机误差应用于实际实验中的公式和定理。

一、随机误差的估算

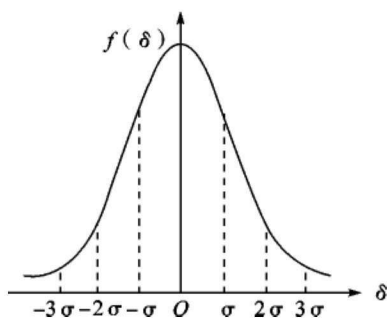


图 1-3-1

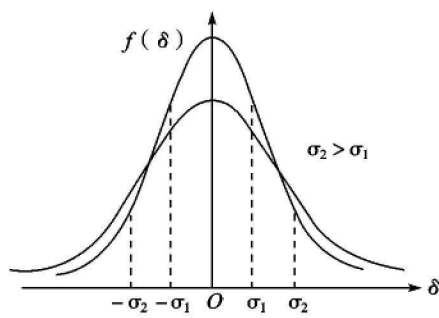


图 1-3-2

随机误差具有统计规律,其中最常见的是高斯分布,其分布曲线如图 1-3-1 所示。这一统计规律在数学中可用高斯误差分布函数来描述,其概率密度函数为(其中绝对误差 $\delta = x - x_0$)

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2}\right] = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-3-1)$$

σ 是式(1-3-1)中的唯一参量,是高斯分布的特征量。在一定测量条件下 σ 是一个常量,从而分布函数就确定下来。测量条件不同造成随机误差大小不同,反映在分布函数上就是 σ 大小不同。如图 1-3-2 所示, σ 大随机误差离散程度大,测量精密度低,大误差出现的次数多,即各次测得值的分散性大、重复性差,分布曲线低而平坦。反之, σ 小随机误差离散程度小,测量精密度高,小误差占优势,即各测量值的分散性小、重复性好,分布曲

线陡而峰值高。因此在重复测量中,对于一组测量值可用特征量 σ 来描述测量的精密度。式(1-3-2)是 σ 的数学表达式。 σ 称为标准误差,又称方均根误差。对同一固定量进行无限多次测量,各次测得值 x_i 与被测量真值 x_0 之差的平方和的算术平均值,再开方所得的数值即为标准误差。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (n \rightarrow \infty) \quad (1-3-2)$$

注意: σ 并不是一个具体测量误差值,它表示在相同条件下进行多次测量后的随机误差概率分布情况,是按一定置信概率给出的随机误差变化范围的一个评定参量,具有统计意义。 σ 是评定所得测量列精密程度高低的指标。

图 1-3-1 归一化曲线下的总面积表示各种误差出现的总概率为 100%,给定区间(即随机误差大小的变化范围)不同,误差出现的概率也就是测量值出现的概率不同。这个给定的区间称为置信区间,相应的概率称为置信概率,用 P 表示。

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta) d\delta = 1 \quad (1-3-3)$$

$$P = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\delta) d\delta = 0.683 \quad (1-3-4)$$

由 $-\sigma$ 到 σ 之间曲线下的面积是总面积的 68.3%,它表示测量列中任一测量值的随机误差落在区间 $[-\sigma, \sigma]$ 内的概率。或者说,当测量次数无限多时测量值落在区间 $[\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma]$ 内的次数占总测量次数的 68.3%。也就是说,在区间 $[\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma]$ 内包含真值的可能性是 68.3%。在区间 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 内的置信概率为 99.7%,也就是大约在 1 000 次测量中,只有 3 次测量值落在该区间之外,而一般测量次数为 5~10 次,几乎不可能出现在区间之外,所以将 3σ 称为极限误差,也称误差限。这也是剔除具有粗大误差数据的依据。区间为 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 的置信概率为 95%。为了比较测量列的精密程度,常用在同一置信概率下区间的大小来表示,置信区间越小则测量列的精密程度越高。

由于真值不能确定,所以 σ 也无法计算。前面讨论过,测量列的算术平均值 \bar{x} 是测量结果的最佳值,也叫近真值,所以标准误差常用 $v_i = x_i - \bar{x}$ 来计算,称为标准偏差或标准差,用 s 表示,可以推导出

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (1-3-5)$$

上式称为贝塞尔公式, s 是测量列中任何一次测得值的标准偏差。

应该指出,用贝塞尔公式表示的标准偏差只是对标准误差 σ 的一个近似,本身也有误差存在,只有当 $n \rightarrow \infty$ 时,它才趋向理论上的 σ 。

至此,在实际实验中,我们有了算术平均值 \bar{x} 作真值的近真值,又根据各种误差公式算出了这列数据的误差值(如用 $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2}$ 算出的标准偏差)来表示其精密度。那么可否用

$$x = \bar{x} \pm s$$

来表示测量结果呢? 回答是不行的。其原因就在标准偏差 s 上。因为我们用了测量列的

平均值 \bar{x} 作近似真值,对这个近似真值的近似程度需要用反映平均值对于真值的离散度的平均值标准误差来评价。而 s 和其他误差都不能反映平均值对于真值的离散度。下面我们分析讨论平均值的标准偏差如何计算。

平均值 \bar{x} 相对于真值 x_0 也有离散性,这很容易理解,因为 \bar{x} 并不是真值 x_0 。对于一个物理量先测得一组 50 个数据,求得平均值 \bar{x}_1 ,再对这一物理量测量 50 个数据,又求得一个平均值 \bar{x}_2 ,甚至可以再测出多组数据 (N 组),求出 N 个平均值 \bar{x}_i ,这 N 个平均值的大小不会完全相同。多个平均值的不同就表示 \bar{x}_i 本身对于真值也存在离散性,即也有随机误差。我们在测量结果中,不但应给出平均值 \bar{x} ,还要指出它的离散程度如何,即用

$$x = \bar{x} \pm s_{\bar{x}} \quad (1-3-6)$$

表示测量结果。式中 $s_{\bar{x}}$ 为用残差计算的平均值标准偏差。平均值标准偏差 $s_{\bar{x}}$ 与标准偏差 s 的关系为

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n(n-1)}} \quad (1-3-7)$$

二、测量次数的确定

在实际测量中,为使测量结果更准确,往往要求增加测量次数,但测量次数的增加,要求在人力、物力和时间方面付出更高的代价,而且在测量中工作时间的延长难以保证环境条件不变化。在物理教学实验中,更因受条件及时间的限制,不能进行多次重复测量。因此,有必要确定合适的测量次数。对于这个问题,有多种确定测量次数的方法,其中最直观易理解的一种方法是根据平均值的标准误差 $s_{\bar{x}}$ 来确定测量次数。

从测量列标准误差 $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2}$ 中可以看出:随着测量次数 n 的增加,会使 s 趋于稳定, s 的数值大小主要取决于测量仪器本身的精密度,它不会因 n 的增大而减小。当 n 较大时 s 是一个基本不随 n 变动的较稳定的值,一般在 $n > 30$ 时, s 值便不再明显变动了。

而从测量列平均值的标准误差 $s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$ 中可以看出,在

s 趋于稳定情况下, $s_{\bar{x}}$ 的值有随 n 增加而减少的趋势。 $s_{\bar{x}}$ 随 n 的变化曲线如图 1-3-3 所示。从图中可以看出,当 $n < 8$ 次时, $s_{\bar{x}}$ 减小得比较快;当 $n = 10 \sim 15$ 次时, $s_{\bar{x}}$ 减小得就比较慢了;当测量次数超过 10 以后, $s_{\bar{x}}$ 的下降已很缓慢了,这样只用提高测量次数的手段来提高测量精度的做法已很不可取。一般选 n 为 8 或 10,欲进一步提高测量精度应从除增大 n 以外的其他方面入手。最根本的办法还是提高测量仪器本身的精度和提高测量仪表的灵敏度。

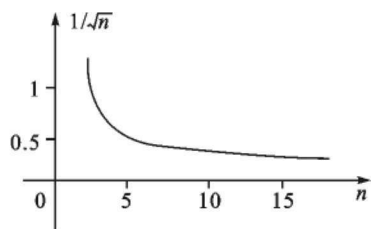


图 1-3-3

三、仪器灵敏阈

在实验中,当我们用数字毫秒计的 0.1 ms 挡(显示读数为 0.000 1 s)多次测量钢球