

高等学校教材

大学物理实验

梁建均 李安生 主编

哈尔滨地图出版社

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主 编：梁建均 李安生

副主编：闫迎利 景义林 吴红燕

编 委：牛文学 赵小侠 侯 越

李从岩 戴岩伟

哈尔滨地图出版社

· 哈尔滨 ·

内 容 提 要

本书是根据大学物理实验教学大纲,结合我院大学物理实验教学的实际情况编写的。全书共分八篇,67个实验,书后有附录,列出了与实验有关的常用数据资料。本书可作为高等院校大学物理实验课的教材,也可供其它专业作为实验教学用书或教学参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/梁建均,李安生编著. — 哈尔滨:哈尔滨地图出版社,
2007.9

ISBN 978-7-80717-761-6

I. 大… II. ①梁… ②李… III. 物理学 - 实验 - 高等学校 - 教材
IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 149175 号

哈尔滨地图出版社出版发行

(地址:哈尔滨市南岗区测绘路 2 号 邮政编码:150086)

安阳师范学院印刷厂印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:20.4 字数:550千字

2007年9月第1版 2007年9月第1次印刷

ISBN 978-7-80717-761-6

印数:1~1000 定价:22.80元

前 言

本书是根据物理实验教学大纲的要求,在多年开设大学物理实验的基础上,结合我院物理实验仪器的现状和大学物理实验在数据处理、计算机应用、物理实验课程改革等方面的新成果、新趋势,以及大学物理实验教学的发展需要而编写的。

全书共分八篇,67个实验,分别为绪论、力学实验、热学实验、电磁学实验、光学实验、原子物理实验、计算机在物理实验中的应用、综合与设计性实验。绪论第一章介绍了大学物理实验的地位、作用、教学环节及如何学好大学物理实验,第二章系统介绍了误差理论、常用的数据处理方法、测量仪器与仪器误差和常用的测量方法等。第二至第六篇在编写上采取以基本实验为主,立足于使学生掌握物理实验的基本思想、知识、方法和技能,培养学生的实验能力、良好的实验习惯、实事求是的科学态度为实验项目的选取原则,为扩展学生的视野,也适当增加了一些难度较大的实验;每篇分两章,第一章介绍该类实验的通用仪器和实验中应普遍注意的问题,第二章是实验项目。第七篇介绍了计算机辅助、模拟、仿真物理实验的知识。第八篇介绍了综合与设计性物理实验方面的知识。

本书由梁建均教授和李安生副教授主编,闫迎利、景义林和吴红燕副教授为副主编。书中第一篇由李安生老师编写;第二篇第一章和第二章的实验一至十四由景义林老师编写;第二篇第二章的实验十五至十七和第三篇由牛文学老师编写;第四篇的第一章与第二章的实验一至二由梁建均老师编写,第二章实验五至十由侯越老师编写,实验十一至十六由赵小侠老师编写;第四篇的第二章实验三至四、第五篇的第一章及第二章的实验一、二和附录由戴岩伟老师编写,实验三至十二由吴红燕老师编写;第六篇由李从岩老师编写;第七和第八篇由闫迎利老师编写。

本书编写时参考了一些兄弟院校编写的大学物理实验教材。并得到我院许多同志的支持和帮助,在此一并致以诚挚的谢意。

由于我们的经验不足、水平有限,书中错误和不足之处在所难免,欢迎各位同仁批评指正。

编 者

2007年8月

目 录

第一篇 绪 论

第一章 大学物理实验概述.....	(1)
第一节 大学物理实验的地位和作用.....	(1)
第二节 大学物理实验的教学环节.....	(1)
第三节 怎样学好大学物理实验.....	(2)
第二章 误差理论及其应用.....	(3)
第一节 物理量的测量与测量误差.....	(3)
第二节 误差的分类.....	(5)
第三节 偶然误差的规律及处理.....	(6)
第四节 系统误差的处理.....	(9)
第五节 过失误差的发现及处理.....	(12)
第六节 测量仪器与仪器误差.....	(14)
第七节 不确定度与测量结果的报道.....	(16)
第八节 直接测量的结果与误差计算.....	(16)
第九节 间接测量的结果与误差计算.....	(17)
第十节 误差传递公式的应用.....	(20)
第十一节 有效数字及近似计算.....	(21)
第十二节 实验数据处理方法.....	(23)
第十三节 实验结果的评价与讨论.....	(29)
第十四节 物理实验的基本测量方法.....	(30)

第二篇 力学实验

第一章 力学实验基本仪器.....	(35)
第一节 微小长度的测量.....	(35)
第二节 微小长度变化的测量.....	(38)
第三节 停表与电子计时器.....	(40)
第四节 天平.....	(42)
第五节 约利弹簧秤.....	(45)
第二章 力学实验项目.....	(45)
实验一 长度测量.....	(45)
实验二 用单摆测定重力加速度.....	(46)
实验三 精密称量.....	(48)

实验四	固体和液体的密度测定	(52)
实验五	杨氏弹性模量的测量(拉伸法)	(54)
实验六	验证牛顿第二定律	(55)
实验七	碰撞实验	(57)
实验八	刚体转动实验	(60)
实验九	三线摆	(62)
实验十	惯性秤	(65)
实验十一	谐振动的研究(用气垫导轨法)	(66)
实验十二	复摆振动的研究	(68)
实验十三	可倒摆	(70)
实验十四	阻尼振动的研究	(71)
实验十五	弦振动的研究	(73)
实验十六	落球法测量液体的黏滞系数	(75)
实验十七	声速的测定	(76)

第三篇 热学实验

第一章	热学实验基本仪器	(79)
第一节	温度计	(79)
第二节	水银气压计	(81)
第三节	干湿泡湿度计	(82)
第二章	热学实验项目	(82)
实验一	金属比热的测定	(82)
实验二	液体表面张力系数的测定	(84)
实验三	金属线胀系数的测定	(91)
实验四	水的汽化热的测定	(94)
实验五	热功当量的测定	(96)
实验六	良导体导热系数的测定	(100)
实验七	测定空气的比热容比	(102)
实验八	沸点与压强关系的研究	(104)
实验九	冰的熔化热的测定	(105)
实验十	真空的获得与测量	(106)

第四篇 电磁学实验

第一章	电磁学实验基本知识	(111)
第一节	电磁测量的方法	(111)
第二节	电磁学实验操作规程	(115)
第二章	电磁学实验项目	(115)
实验一	制流电路与分压电路	(115)
实验二	伏安法测二极管的特性	(120)

实验三	静电场的描绘	(123)
实验四	用板式电势差计测电池的电动势和内阻	(128)
实验五	低电阻的测量	(132)
实验六	万用表的制作和定标	(137)
实验七	万用表的原理与使用	(145)
实验八	用箱式电势差计校准电表	(148)
实验九	霍耳效应	(155)
实验十	惠斯通电桥测电阻	(161)
实验十一	灵敏电流计特性的研究	(165)
实验十二	半导体热敏电阻特性的研究	(169)
实验十三	磁场的描绘	(171)
实验十四	电子示波器的使用	(176)
实验十五	交流电桥	(183)
实验十六	LRC 电路的暂态过程研究	(189)

第五篇 光学实验

第一章	光学实验的基本仪器	(197)
第一节	光具座	(197)
第二节	测微目镜	(198)
第三节	分光计	(199)
第四节	读数显微镜	(204)
第五节	光学实验中常用光源	(205)
第六节	光学仪器的正确使用与维护	(206)
第二章	光学实验项目	(207)
实验一	薄透镜焦距的测定	(207)
实验二	分光计的调整及棱镜折射率的测定	(210)
实验三	迈克尔逊干涉仪的调整及使用	(214)
实验四	牛顿环	(218)
实验五	用阿贝折射仪测定透明介质的折射率	(222)
实验六	显微镜和望远镜	(225)
实验七	平行光管的调整及使用	(231)
实验八	用菲涅耳双棱镜测波长	(236)
实验九	测定单缝衍射的光强分布	(239)
实验十	用透射光栅测光波波长及角色散率	(242)
实验十一	偏振光的观察和分析	(244)
实验十二	用旋光仪测定糖溶液的浓度	(247)

第六篇 原子物理学实验

实验一	密立根油滴实验	(250)
-----	---------	-------

实验二	夫兰克-赫兹实验	(254)
实验三	塞曼效应	(256)
实验四	电子衍射	(260)
实验五	光电效应测普朗克常数	(264)
实验六	用 DF 型电子衍射仪做多晶体分析	(268)
实验七	钠原子光谱	(270)
实验八	氢原子光谱	(273)

第七篇 计算机在物理实验中的应用

第一章	计算机辅助物理实验	(277)
第一节	采集物理实验数据	(277)
第二节	实验数据的处理	(282)
第二章	计算机模拟物理实验	(283)
第一节	计算机模拟物理实验介绍	(283)
第二节	计算机模拟物理实验的基本方法	(284)
第三节	计算机模拟实验举例	(285)
第三章	仿真物理实验	(289)
第一节	仿真实验室的特点	(289)
第二节	计算机仿真实验操作方法	(290)

第八篇 综合与设计性实验

第一章	综合实验基本知识	(293)
第一节	物理实验中的非电量电测法介绍	(293)
第二节	综合传感器实验	(296)
第三节	综合应用实验	(299)
实验一	非金属固体材料导热系数的计算机辅助测量	(299)
实验二	压电陶瓷的电致伸缩系数的测量	(304)
第二章	设计性实验	(306)
第一节	科学实验的基本程序	(306)
第二节	怎样做好设计性实验	(308)
第三节	设计性实验	(310)
实验一	白炽灯与热辐射	(310)
实验二	数字温度计的制作	(311)
附录	实验常用数据表	(314)

第一篇 绪 论

第一章 大学物理实验概述

第一节 大学物理实验的地位和作用

物理学是一门实验科学,任何物理概念和规律的确立都必须以严格的科学实验为基础,人们从物理实验中探索和发现的新的物理现象和规律,以及由此提出的理论和假设,也必须用物理实验和生产实践来检验,可以肯定地说:“物理实验是物理学发展的基础。”

大学物理实验是对大学生进行实验教育的入门课程,作为单独设立的一门实验课,物理实验有其自身的思想、知识、方法和技能,学习本门课程,就是要使学生掌握物理实验的基本思想、基本知识、基本方法和技能。学生通过完成精心挑选的实验项目,能初步达到掌握常用物理量的测量方法,会选择和使用常用物理实验仪器,会用误差理论确定实验参量、处理实验数据,能对实验结果的误差做出正确的分析和判断,能写出符合要求的实验报告等。并通过各个具体的实验项目,给学生以严格的实验训练,培养初步的实验能力、良好的实验习惯、实事求是的科学态度和严谨的工作作风,为做好“近代物理实验”和其他专业实验课奠定良好的基础,为逐步达到能根据物理学研究课题自行设计并完成实验的目标做好必要的知识和技能准备。这不仅是大学物理实验课的作用,也是设置大学物理实验课的主要目的。

另外,通过对物理实验现象的观测和分析,可以加深对物理概念和规律的认识,这也是开设大学物理实验课的目的之一。

第二节 大学物理实验的教学环节

物理实验是学生在教师指导下独立进行的一种实践活动,因此,实验中既要很好地发挥教师的指导作用,又要充分发挥学生的主观能动性,有意识地培养学生的独立工作能力和严谨的工作作风。物理实验一般分三个环节:预习、实验、写实验报告。

一、预习

预习是物理实验的准备环节。预习时要仔细阅读实验教材,了解实验目的,弄懂实验原理和

方法,并对所要使用的实验仪器的性能、原理、使用方法和注意事项做到心中有数。一般应到实验室看一下所用的仪器和设备。对每个实验中所列的预习思考题必须搞清楚,并在此基础上写出预习报告。预习报告主要包括:实验中要观察的物理现象和要测定哪些物理量,用什么仪器和方法来测定;写出实验步骤,画出必要的草图或电路图,列出数据记录表格。

二、实验

进实验室应遵守实验室的规章制度。实验时应首先对实验所用仪器和工具是否完好进行检查,并经适当练习达到能正确操作的程度,在此基础上正确地组装和调整仪器,仪器的摆放要注意满足使用条件,要便于操作、观察和读数,仪器要稳拿轻放,防止损坏。做电磁学实验必须经教师检查电路连接无误后,方可通电进行实验。实验时应先从整体上观察现象,并注意仪器显示是否失常,确认正常无误后,再进行精确测量。测量时要集中精力仔细观察,把仪表上显示的数据直接记录在预习报告上的数据表格内,不允许作任何处理(这种数据一般称原始数据),在可能的情况下,读数时必须对小于分度值的数进行估读,这是仪器读数的一般规则。记录时要用钢笔或圆珠笔,不要用铅笔。若认为记录的数据有误,可用笔划掉,同时注明原因,但不得涂抹,条件许可时应补测数据。数据切勿先记录在草稿纸上,然后再誊写在记录表格内,这是一种不科学的习惯。此外,还要记录所用仪器的型号、规格、编号,并记入正式的实验报告中,便于以后核查或重复实验。实验完成后,要对获得的数据进行粗略的分析,确认结果基本合理或经指导教师审查无误后,再拆卸实验装置,并归整仪器和工具。经指导教师检查、同意后方可离开。

三、写实验报告

实验完成后,要及时处理和分析获得的实验数据,从而得出合理的实验结果,然后用简洁的文字撰写实验报告。实验报告要用统一印制的实验报告纸书写,报告应字迹清楚、文理通顺、图表正确,并对实验中的问题进行分析、讨论,逐步培养分析问题的能力。报告中的原理图、电路图可以随手画出,但对实验结果的图解表示必须认真仔细,力求准确,并利用规尺或曲线板画在坐标纸上。实验报告的内容一般应包括如下几部分:

- (1) 实验名称:同时填写实验者姓名、班级、组别,实验时间、地点和必要的环境数据等。
- (2) 实验目的:按实验教材要求或指导教师的要求填写。
- (3) 实验仪器:注明所用仪器的名称、规格、型号、编号,必要时画出简图。
- (4) 实验原理:用简洁的语言写出原理概要(包括原理图)或测定公式,注明公式中各量的物理意义。
- (5) 实验步骤:写出实验的简要步骤及注意事项。
- (6) 实验记录:将记录在预习报告表格内的数据仔细地转记到实验报告的相应表格内,并注明单位。
- (7) 实验数据处理:处理实验数据得出实验结果及误差,给出实验结果的图示等。
- (8) 实验讨论:对实验结果进行分析讨论,回答课后作业等。

第三节 怎样学好大学物理实验

由于中学阶段对实验的训练比较薄弱,因此要学好大学物理实验不仅要下较大的工夫,而且要讲究一定的学习方法。怎样才能学好这门课呢?

一、要目的明确

开设大学物理实验课的目的是:使学生掌握物理实验的基本思想、基本知识、基本方法和技能,培养初步的实验能力、良好的实验习惯、实事求是的科学态度、坚韧的毅力和严谨的作风。教材中精心挑选的实验项目,是为了达到该教学目的而选取的载体,通过这些载体,逐步地、循序渐进地将物理实验的思想、知识、方法和技能展示给学生,并通过实验使学生掌握它们,同时,通过实验培养同学们的实验能力、良好习惯,等等。而实验结果的好坏并非我们实验的根本目的,不要因实验结果较好而沾沾自喜,也不要为实验结果不理想而垂头丧气,关键是实验的目的是否真正达到了,例如:该实验设计思想是否真正理解了、该实验是如何减小误差的、所用仪器的原理和使用方法是否掌握了、实验中的一些技能和技巧是否学会了等。当出现实验数据不佳时,要学会分析实验过程、查出原因,逐步提高实验的能力。

二、要以研究者的态度进行实验

这样能提高实验兴趣,加深对实验思想的理解,促进实验知识的掌握。要多和物理理论联系,用理论指导实验,要多动脑、慎动手,充分发挥自身的主观能动性,探讨最佳实验方案,不要机械地执行教师的指令或照搬教材上的步骤进行实验。

三、要有意识地培养良好的实验习惯

良好的实验习惯能避免实验差错,保证实验安全,由于习惯不是操作规程或守则,而是一些不起眼的动作甚至一个操作姿势(例如注意随时将用过的小仪器或仪器附件(如透镜)放回仪器盒中或者规定的地方),因而很容易被忽视,若不有意识地培养是不易养成好习惯的。

四、要掌握好每次实验的重点

每个实验都类同一只麻雀,五脏俱全。由于人的精力有限和实验课的时间限制,实验的每一步都十分认真是不可能的,因此,必须分清实验的重点和枝节以及影响结果的关键因素和次要因素,将主要精力放在这些重点和关键的步骤上去。重点和关键点可经误差分析得出或在实验目的中指明。

物理实验有其自身的规律和特点,要学好物理实验不是一件容易的事,希望同学们能在学习过程中充分发挥自己的主观能动性,不断地总结经验、提高兴趣、打好基础,逐步把自己培养成为合格的物理学工作者。

[思 考 题]

1. 大学物理实验课的地位是什么?在物理教学中的目的和作用是什么?
2. 大学物理实验有哪些教学环节?各应注意哪些问题?
3. 要学好大学物理实验应重点注意哪些方面?

第二章 误差理论及其应用

第一节 物理量的测量与测量误差

物理实验的任务不仅是定性地观察某种物理现象,更重要的是定量地测定相关的物理量,测量是物理实验的中心内容。什么是测量呢?测量是借助测量仪器将待测的物理量与规定为标准单位的同类物理量进行比较,从而获得测量值的过程。测量值由数值和单位两部分组成,二者缺

一不可。

测量可分为直接测量和间接测量两大类。凡是可以使用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量称为直接测量,如用米尺测长度、用电压表测电压,等等,这些都是直接测量,所得的物理量如长度、电压等称为直接测量值。另一类是待测物理量无法进行直接测量,需依据待测量与若干个直接测量值的函数关系求出,这样的测量就称为间接测量,相应的测量值称为间接测量值。例如,测量单摆的摆长 L 和周期 T ,由公式 $g = 4\pi^2 L/T^2$ 算出重力加速度 g 值的过程就是间接测量。

无论是直接测量还是间接测量,按测量次数又可分为单次测量和多次测量。多次测量还可按测量条件分为等精度测量和不等精度测量。通常把在对某一物理量进行多次重复测量的过程中,每次测量条件都相同的一系列测量称为等精度测量。例如:由同一个人在同一仪器上采用同样测量方法对同一待测物理量进行多次测量,每次测量的可靠程度都相同,这些测量是等精度测量。如果在对某一物理量进行多次测量时,测量条件完全不同或部分不同,各测量结果的可靠程度自然也就不同,这样的一系列测量称为不等精度测量。例如:在对某一物理量进行多次测量时,选用的仪器不同,或测量方法不同、测量人员不同等都属于不等精度测量。

一般来讲,在实验中在保持测量条件完全相同的情况下进行多次测量是极其困难的。但当某一条件的变化对结果影响不大时,仍可把这种测量视为等精度测量。等精度测量的数据处理比较容易,所以绝大多数实验都采用等精度测量,较少采用不等精度测量。

被测物理量在实验当时条件下所具有的客观真实的数值称为真值。实验测量就是在一定条件下,使用一定的仪器,通过一定的方法,力图获得真值的过程。但是,由于受实验测量方法、实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性、测量过程对被测物理量原来状态的影响、环境的不稳定性等因素的限制,通常只能获得待测量的近似测量值 X ,测量值 X 和真值 A_0 之间总有一定的差异,我们称这种差异为测量值的误差,又称绝对误差,用 Δ 来表示,即

$$\Delta = X - A_0 \quad (1.2-1)$$

注意:绝对误差不是误差的绝对值,它可正可负。绝对误差与测量值有相同的单位。需要明确的是:真值是无法确知的,上述定义只是理论上的,实际使用时常用被测物理量的约定真值 A 来代替。约定真值被认为是非常接近真值的,其间的差别可略去,通常用被测物理量的理论值、标称值、校准值、公认值或算术平均值作为约定真值使用,相应的误差公式为:

$$\Delta = X - A \quad (1.2-1)'$$

绝对误差与真值(或约定真值 A)之比称为相对误差,相对误差 E 常用百分数来表示,即

$$E = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1.2-2)$$

由于一般情况下测量值与真值相差不会太大,故也常用误差与测量值 X 之比作为相对误差。即

$$E = \frac{\Delta}{X} \times 100\% \quad (1.2-2)'$$

显然,相对误差是没有单位的。相对误差常用于不同数量级、不同种类、不同单位物理量测量结果的比较或综合。例如:测量运动场跑道的长度 L 、单摆的摆长 l 和摆动周期 T 结果如下:

$$L = 400.23 \pm 0.05\text{m}$$

$$l = 98.4 \pm 0.1\text{cm}$$

$$T = 1.996 \pm 0.003\text{s}$$

很明显,跑道长度的测量误差是摆长测量误差的 50 倍,摆长的测量误差小,但是两种测量结

果的相对误差分别为 $E_L = 0.0125\%$ 和 $E_l = 0.1\%$, 显然跑道长度的测量结果比摆长的测量结果好。而周期测量的相对误差为 $E_T = 0.15\%$, 周期的测量没有摆长的测量结果好。

应该指出, 测量所得的一切数据都包含着一定的误差, 误差存在于一切科学实验过程中, 并因测试理论、测试环境、测试技术等不同而有所差异。由于真值是不能确知的, 因而测得值的误差也不能确切知道, 那么测量有什么意义呢? (1) 给出被测物理量真值的最佳估计值; (2) 给出最佳估计值的可靠程度的估计。整个测量工作就是围绕这两项任务展开的。

第二节 误差的分类

测量不可避免地存在误差, 为了减小误差, 并对残存的误差大小给出适当的估计, 必须对误差做进一步研究。本节根据误差自身的特点和规律, 将误差分成系统误差、偶然误差和过失误差。下面分别进行讨论。

一、系统误差

在同一情况下多次测量同一物理量时, 误差的大小和符号始终保持不变或按某一确定的规律变化的误差称为系统误差。如仪器的缺陷、测量方法不完善或环境变化等对测量结果造成的误差, 都属于系统误差。

系统误差是有规律的。在测量条件不变时有确定的大小和方向, 增加测量次数并不能减小系统误差。在实验之前, 应对测量中可能产生的系统误差加以充分的分析和估计, 并采取必要的措施, 在实验中尽量消除其影响。测量后应设法估计未能消除的系统误差之值, 对测量结果加以修正。

虽然系统误差的出现一般都有明确的原因, 但是发现、减小和消除系统误差并没有一定的规律可循, 只能在实验过程中逐渐积累经验、掌握技术、提高实验素养, 减小或消除系统误差。系统误差的分析是实验必须讨论的问题之一。

二、偶然误差

在相同测量条件下, 多次测量同一物理量时, 误差的绝对值和符号不断变化, 时大时小, 时正时负, 这种完全是偶然的、不可预知的误差称为偶然误差。

在测量中, 有时排除了产生系统误差的各种因素, 在精心的观察测量中, 仍存在一定的偶然误差。这种误差是由于人的感官灵敏程度和仪器精密程度有限、周围环境的干扰以及随测量而产生的偶然因素决定的, 如用毫米刻度的米尺去测量某物体的长度时, 往往用米尺对准物体两端并估读到毫米下一位的读数值, 这个数值就存在一定偶然性, 也就带来了偶然误差。由于偶然误差的变化不能预先确定, 所以对待偶然误差不能像对待系统误差那样, 找出原因排除, 也无法避免, 而只能估计。

虽然偶然误差的存在使每次测量值偏大或偏小, 但是, 当在相同的实验条件下, 对被测量值进行多次测量时, 其大小的分布却服从一定的统计规律, 可以利用这种规律对实验结果作出偶然误差的估算。这就是在实验中往往对某些关键量要进行多次测量的原因。

三、过失误差

过失误差是由于观测者不正确地使用仪器、观察错误或记录数据错误等不正常情况引起的误差。过失误差又称为粗差, 它会明显地歪曲客观现象, 应将其剔除。只要实验者认真细致, 过失误差是可以避免的, 所以, 在作误差分析时, 要估计的误差通常只有系统误差和偶然误差。

四、不同误差对测量结果评价的影响

对测量结果进行评价时,常用到精密度、准确度和精确度的概念。这些概念含义不同,现分述如下。

1. 精密度

精密度表示测量结果中的偶然误差大小的程度。它是指在一定的条件下进行重复测量所得结果的相互接近程度,即描述测量重复性的高低。精密度高,即测量数据的重复性好,偶然误差较小。

2. 准确度

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

3. 精确度

精确度是测量结果中系统误差和偶然误差的综合。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,精确度才高。

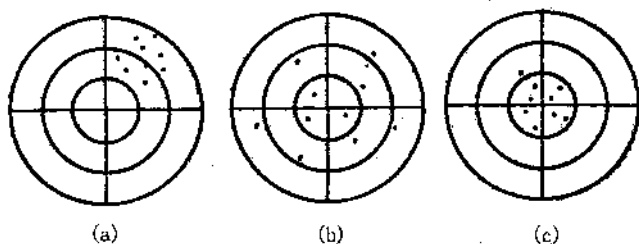


图 1.2 - 1

现在以打靶结果为例来形象说明三个“度”之间的区别。图 1.2 - 1

中(a)表示弹着点相互之间比较靠近,但偏离靶心较远,即精密度高而准确度较差。图(b)表示弹着点相互之间比较分散,但没有明显的固定偏向,故准确度高而精密度较差;图(c)表示弹着点相互之间比较集中,且都接近靶心,精密度和准确度都很好,亦即精确度高。

总之,由于误差的性质不同、来源不同和处理方法不同,对测量结果的影响也不同。有时系统误差与偶然误差可以加以区别,有时又难以划分,并且有时两者之间能够互相转化。因此,有必要对误差进行更进一步的研究和讨论,用误差分析的思想方法来指导实验的全过程。

第三节 偶然误差的规律及处理

一、偶然误差的分布规律

偶然误差服从统计规律,在数学上可用概率与数理统计知识来处理。大量事实和理论证明,大部分测量的偶然误差都服从正态分布(有些情况下遵从其他分布,如均匀分布等),又称高斯分布。正态分布的偶然误差具有如下四个特点:

1. 绝对值相同的正负误差出现的几率相同,即它们的分布具有对称性。
2. 当测量次数无穷多时,各测得量的偶然误差之和趋于零。偶然误差具有抵偿性。即

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

3. 绝对值小的偶然误差出现的几率大,绝对值大的偶然误差出现的几率小,其分布具有单峰

性。

4. 绝对值很大的偶然误差出现的几率趋于零,即偶然误差的分布具有有界性。

设一待测物理量的真值为 x_0 , 在等精度测量条件下的一系列测量值为 $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$, 假定系统误差已修正, 则(绝大多数情况下)偶然误差 $\Delta_i = x_i - x_0$ 的概率密度函数为正态分布:

$$f(\Delta_i) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\Delta_i^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.2-3)$$

其中 σ 为测量列的标准误差(或均方误差), 定义如下:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}} \quad (1.2-4)$$

由于一般情况下真值是无法确知的, Δ_i 也无法计算, 所以标准误差只有理论上的意义。实验时用平均值作为真值的最佳估计值, 因而可以用平均值去参与标准误差的估计。常使用如下的贝塞尔公式去估计标准误差。

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \nu_i^2}{n-1}} \quad (1.2-5)$$

式中测量值与平均值之差 $\nu_i = (x_i - \bar{x})$, 称为测量值 x_i 的残差, 它是可以求出的。贝塞尔公式是用残差去求标准误差的估计值 $\hat{\sigma}$, 称此估计值为标准偏差。上述标准偏差又称为测量列的标准偏差(或称为单个测量值的标准偏差), 主要强调由一系列测量值求出的标准偏差, 是估计一个测量值误差情况的, 而且对该列测量值中的任何一个都一样。

标准误差不是测量值的实际误差, 也不是误差范围, 它是对一组测量数据可靠性的估计, 是测量数据离散程度的反映。当 σ 较小时, 正态分布曲线高而窄, 如图 1.2-2, 误差分布在较小的范围内, 测量数据的离散性小、重复性好, 即精密度高。当 σ 较大时, 正态分布曲线低而宽, 误差在较大的范围内变动, 测量数据的离散性大、重复性差, 即精密度低。根据数理统计, 服从正态分布的任一测得值的误差 Δ 落在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间的概率为 68.3%, 落在 $(-2\sigma, +2\sigma)$ 区间的概率为 95.5%, 落在 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 区间的概率为 99.7%, 通常称 3σ 为极限误差。而要计算误差落在给定区间 $(-\Delta, +\Delta)$ 的概率, 需经变量变换 $Z =$

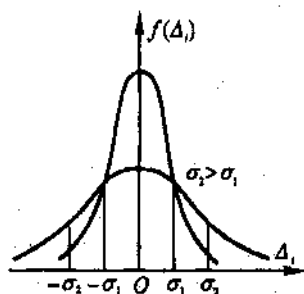


图 1.2-2

$\frac{\Delta}{\sigma}$, 将正态分布 $N(0, \sigma)$ 变为标准正态分布 $N(0, 1)$, 则在区间 $(-Z, +Z)$ 内出现的概率为:

$$P_Z = (\text{erf } Z) = \int_{-Z}^{+Z} P(Z) dZ = \int_{-Z}^{+Z} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Z^2}{2}\right) dZ \quad (1.2-6)$$

P_Z 称误差函数, 通常用 $\text{erf } Z$ 表示, 误差落在区间 $(-Z, +Z)$ 的概率, 可由正态分布积分表查出。例如 $Z = 1, P_Z = 0.683, Z = 2, P_Z = 0.954$ 。对不同的 Z 值, 测量值的偶然误差在区间 $(-Z, +Z)$ 内出现的概率是不同的, 这反映了测量结果的可信程度不同, 为此我们称与 Z 相对应的概率 P_Z 为置信概率, 也称置信度, 相应的 Z 称置信系数。当给定置信系数 Z 之后, 对应的误差 $\Delta = Z\sigma$ 称为置信限或误差限, 由此确定的区间 $(-Z\sigma, +Z\sigma)$ 为置信区间。例如, 取 $Z = 2$ 时, 任一测量结果的误差不超过 2σ , 或落入区间 $(-2\sigma, +2\sigma)$ 的置信度为 0.954, 或 95.4%。实际使用时用 $\hat{\sigma}$ 代替 σ 确定误差限 $\Delta = Z\hat{\sigma}$ 。

需要指出的是,当测量次数 n 较少时,由贝塞尔公式计算的标准偏差 $\hat{\sigma}$ 与总体的标准误差 σ 有较大的差异,因而用 $\hat{\sigma}$ 代替 σ 计算的误差限时,置信系数不再由正态分布决定,而应按“学生”分布计算,“学生”分布简称“ t ”分布,且“ t ”分布的置信系数符号用 t_α 或 t_p 表示。它和置信概率 $p = 1 - \alpha$ 有关(α 称为显著度或危险率),还和测量次数有关($\nu = n - 1$, ν 称为自由度)。 t_α 值可查 t 分布临界值表,见附表2。例如,测量10次, $\nu = 9$, 当置信概率 $p = 0.95$ 时($\alpha = 0.05$),查表 $t_\alpha = 2.26$, 误差限 $\Delta = t_\alpha \hat{\sigma} = 2.26 \hat{\sigma}$, 而非正态分布情况下的 $1.96 \hat{\sigma}$ 。

二、偶然误差的处理方法

1. 算术平均值——被测量真值的最佳估计值

设等精度测量某物理量的测量值为 $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$, 假定系统误差已消除, 则其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2-7)$$

设该物理量的真值为 A_0 , 则误差 $\Delta_i = x_i - A_0$, 对所有误差取和

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i = (x_1 - A_0) + (x_2 - A_0) + \dots + (x_n - A_0)$$

两端同除以 n 并取极限

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) - A_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - A_0$$

由偶然误差的抵偿性可知,左端的极限为零,故必然有 $\bar{x} = A_0$ 。实际上测量次数是有限的,算术平均值不可能准确等于真值,但由于偶然误差的对称性,相加时总会抵消一些,所以 n 越大,算术平均值越接近真值。因此算术平均值是被测量真值的最佳估计值,也称近真值。

2. 算术平均值的标准误差和标准偏差

上面我们讨论了一组等精度测量中,任一测量值偏离真值的情况,我们用标准误差 σ 来反映它们与真值的离散情况。由于算术平均值是被测量真值的最佳估计值,因而算术平均值也就是测量的最佳结果。但是,由于测量次数是有限的,算术平均值和真值总有误差,算术平均值偏离真值的情况如何呢?类似地,我们用算术平均值的标准误差来反映它与真值的离散情况。由于算术平均值是真值的最佳估计值,它较测量值更接近真值,可以证明算术平均值的标准误差 $\sigma(\bar{x})$ 与测量列的标准误差 σ 的关系为:

$$\sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.2-8)$$

式中 n 为测量次数,算术平均值标准误差的估计值标准偏差 $\hat{\sigma}(\bar{x})$, 与测量列的标准偏差 $\hat{\sigma}$ 同样具有类似的关系

$$\hat{\sigma}(\bar{x}) = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum \nu_i^2}{n(n-1)}} \quad (1.2-9)$$

若测量数据中系统误差已全部消除,测量结果的表达为

$$x = \bar{x} \pm \hat{\sigma}(\bar{x}) \quad (p = 0.683) \quad (1.2-10)$$

上式的含义是被测量 x 的测量结果为 $\bar{x}$, 误差不超过 $\hat{\sigma}(\bar{x})$ 的置信度为 0.683。

3. 测量次数 n 的作用

从上面的讨论可看出,增加测量次数 n , 可以使平均值误差的绝对值减小,即误差区间相同的情况下,平均值的可靠性(置信度)增加了。所以一般在测量时都要进行多次重复测量。增加测量次数虽然对平均值是有益的,但也不是次数越多越好。因为

(1) n 增大只是对减小偶然误差有作用,对系统误差则无影响,而测量误差是偶然误差与系统误差综合,所以增加测量次数对控制测量误差的价值是有限的。

(2) 从式(1.2 ~ 9) 可以看出,增加 n 对减小 $\hat{\sigma}(\bar{x})$ 的作用将随 n 的增大而下降。

(3) 测量次数过多,测量者将疲劳,测量条件也可能出现不稳定,因而有可能出现增加偶然误差的趋势。

综合上述,增加测量次数,虽然可提高平均值的可靠程度,但是作用有限。实际上,只有改进实验方法和仪器,才能从根本上改善测量的结果。

在科研工作中的测量次数可以多一些,而在学生实验中取 4 ~ 10 次即可,具体测量时测量次数取多少,要根据被测量偶然误差影响的大小去确定。如遇下列情况应当多测几次:

- ① 测量值的有效位数较少时;
- ② 测量值变动较大时;
- ③ 表现为二数差(如 $T - t$) 的测量时;
- ④ 被测物理量自身有变化(如棒的直径各处不同) 时;
- ⑤ 在公式中是高次方的量(如 $g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$ 中的 T)。

第四节 系统误差的处理

在实验和测量工作中,系统误差的存在是不可避免的,若不能有效地加以消除,就会使测量结果受到歪曲,从而不能保证测量结果的正确性,按照偶然误差理论评定测量结果的精度也就没有什么意义。因此,在任何一项实验工作和具体测量中,首先必须要想办法最大限度地减小和消除一切可能存在的系统误差。由于实验和测量过程中造成系统误差的因素是各式各样的,也是十分复杂的,只有弄清其产生的各种原因,了解其特点,掌握其规律,才有可能有效地减小和消除它的影响。下面从系统误差的分类、检出、修正几方面进行讨论。

一、系统误差的分类和特点

1. 系统误差按其不同变化特性分类

根据系统误差在测量过程中所具有的不同变化特性,将它分为恒定(恒值)系统误差和可变(变值)系统误差两大类。恒定系统误差指在整个测量过程中,误差的大小和符号始终是不变的。如千分尺或测长仪读数装置的调零误差,量块或其他标准件尺寸的偏差等,均为恒定系统误差。它对每一测量值的影响均为一个常量。它属于最常见的一类系统误差。可变系统误差指在整个测量过程中,误差的大小和方向随测试的某一个或某几个因素按确定的函数规律变化。它的种类较多,又可分为以下几种。

(1) 线性变化的系统误差 在整个测量过程中,随某因素而线性递增或递减的系统误差。例如检定标尺时,室温对标准温度 20°C 的偏差产生的测量误差,它是随被测长度而线性变化的系统误差。

(2) 周期性变化的系统误差 在整个测量过程中,随某因素作周期变化的系统误差。例如测量仪器中,千分表表盘的中心与指针回转中心的偏离引起的示值误差,光学分度头中分度盘等安装偏心引起的分度误差,都属于正弦函数规律变化的系统误差。

(3) 复杂规律变化的系统误差 在整个测量过程中,按一定的复杂规律变化的系统误差。例