

高等学校教学用书

大学物理实验

(第三版)

主编 魏怀鹏 展永
季世泰 王存道



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

高等学校教学用书

大学物理实验

(第三版)

主 编 魏怀鹏 展 永
季世泰 王存道



天津大学出版社

Tianjin University Press

内 容 提 要

本书是国家“211 工程”建设重点大学河北工业大学“大学物理实验”教学指定专用教材,是在原第一、二版的基础上修订增补而成的。三版教材保持了第一、二版讲解细致、结构合理、突出设计性实验和综合性实验的特点,同时引入了一些新实验及新的教学方法。

全书共分为九章:第一章阐述了误差与实验数据处理的有关知识,包括不确定度及其简化估算;第二章系统地介绍物理实验中的基本测量方法、测量技术和仪器调整方法;第三章介绍物理实验常用仪器;第四章介绍力学实验;第五章介绍电磁学实验;第六章介绍光学实验;第七章介绍近代物理实验与综合性实验;第八章重点介绍设计性实验的方法、方案等;第九章介绍计算机在物理实际问题中的一些应用设计实验。另外新增附录介绍计算机检测维修的一些基本步骤和方法。本书精选了 60 余个实验,按训练的性质、层次进行分类编写,是一本具有新内容、新特点的实验教材。

本书可以作为高等院校本科、专科专业的教学用书,也可作为实验技术人员或有关课程教师的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/展永等主编. —3 版. —天津:天津
大学出版社,2004. 9
ISBN 7-5618-1106-3

I. 大… II. 展… 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(2004)第 091525 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨风和
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
网 址 www.tjup.com
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
印 刷 昌黎太阳红彩色印刷有限责任公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm×260mm
印 张 19.5
字 数 488 千
版 次 1999 年 1 月第 1 版 2004 年 9 月第 3 版
印 次 2004 年 9 月第 3 次
印 数 7 001—10 000
定 价 25.00

序

《大学物理实验》是高等学校工科专业的一门必修课。科学实验是科学理论的基础和源泉,理论对实验具有指导作用。通过这门课程的学习,学生受到科学实验的系统训练,其重要性自不待言。编写这本著作的老们,长期在高等学校的教学岗位上辛苦耕耘,积累了丰富的理论与实践经验,特别是1978年以来,大学物理实验课程改革的经验。可以说,本书也是这些老们长期耕耘的一个收获。

本书有以下特点:

第一,本书在内容上,既重视基础实验的系统、全面介绍,同时又重视科学发展、技术进步对物理实验的影响。例如,用整整一章的篇幅,介绍计算机在物理实验中的应用,紧密结合实际,并分别给出多个实验,在同类书中具有特色。

第二,教学要求上,体现出既重视基本实验技术的训练,又重视综合实验能力、实验创新能力的培养。因此,增加了不少综合实验和设计实验。

第三,文字编写方面,力求叙述准确、细致、清晰。使读者读了本书的相关章节就能够独立地完成相应的实验。

本书曾在河北工业大学历届学生的大学物理实验课程教学中使用,并经过多次改写编著,使用效果好,得到广大师生的好评。本书是高等学校大学物理实验课程的一本好教材,同时,也可作为相关专业人员的参考书。

杨国琛

2004年3月

第三版前言

根据“高等工业学校物理实验课程教学基本要求”编著的《大学物理实验》自1999年1月正式出版以来,已经过多次印刷和第二次再版。本书自编原稿教材和正式出版教材,已经过国家“211工程”重点学校河北工业大学历届教师和学生近20年的教学实践使用,深受广大读者的欢迎。本次修订再版,主要在以下几方面作了增补修订。

①根据1994年修订的《测量误差及数据处理技术规范》中规定的使用不确定评定测量结果的误差要求,重新对第一章误差与数据处理基础知识进行了修订改写。

②在设计实验中,介绍了一种较新的教学方法。即根据实验原理和误差理论,确定设计实验的合理方案,正确地选择实验仪器,制定实验方法,再通过亲自动手实践来验证设计实验方案,并对结果进行分析研究,得出结论。

③计算机的应用越来越广泛、越来越重要为大势所趋,为此重新修订了第九章计算机在物理实际问题中的应用设计实验。对传感器的应用设计研究实验、计算机的物理应用技术、计算机故障检测维修的一般步骤和基本方法作了一些介绍。

此次修订再版,由河北工业大学魏怀鹏、展永、王存道、季世泰进行修订和编写。本书历次修订再版,都得到河北工业大学教务处、理学院领导的大力支持,物理实验中心全体同事一直给予大力的协助,借再版之际,特别表示衷心的感谢。

要编写一本新型体系的教材,必须经过艰苦而又复杂的劳动,不断地进行改革实践和长期地研究探索,才能日臻完善。我们所做的工作仅仅是抛砖引玉,缺点和错误在所难免,敬请读者赐教、指正。

编者

2004.7

前 言

本书根据“高等工业学校物理实验教学基本要求”，以河北工业大学多年使用的物理实验讲义为基础，并参考部分兄弟院校有关教材编写而成，可供工科大学各专业物理实验教学使用，也可供专科、业大学选用。

物理实验是一门独立设置的基础课，因此本书在内容上采用统一编排的方法，以求有完整的体系。在实验选题方面，按照物理内容分章编写，以适应不同情况下的各种教学安排。

在误差与数据处理上，本书以不确定度评定实验结果，要求学生从一开始就接受正规的实验数据处理训练，使实验结果的评定能初步达到国标的统一要求。

在具体实验内容编写中力求做到目的明确、原理简洁清楚、公式推导完整、实验步骤简单明了，并安排一定的思考练习题。在基本实验后面安排一章设计性实验，要求学生能独立完成实验过程，进一步培养学生的综合实验能力。

实验教学是一项集体的事业，作为本书基础的讲义就是在使用过程中，经过教研室全体同志多次修订与改编逐步积累而成。本书绪论、第一章、第二章和第八章 § 8.0 由王存道编写；第四章、第七章以及第三章 § 3.1 ~ § 3.5 和第八章 § 8.1 由魏怀鹏编写；第六章以及第三章 § 3.8、§ 3.9 和第八章 § 8.3 由张德贤编写；第五章以及第三章 § 3.6、§ 3.7 和第八章 § 8.2 由季世泰编写。最后由王存道和魏怀鹏整理并统稿。

由于编者水平所限，本书难免存在一些错误和不妥之处，衷心希望使用者批评指正。

编者

1998 年 1 月

目 录

绪论	(1)
第一章 误差与数据处理基础知识	(3)
§ 1.1 测量误差	(3)
§ 1.2 测量结果的不确定度	(8)
§ 1.3 有效数字	(14)
§ 1.4 实验数据处理方法	(16)
§ 1.5 计算器的统计功能简介	(21)
第二章 测量方法与仪器调整原则	(25)
§ 2.1 测量方法	(25)
§ 2.2 仪器调整的基本原则	(27)
第三章 物理实验常用仪器	(30)
§ 3.1 长度测量的基本仪器	(30)
§ 3.2 质量测量仪器——天平	(35)
§ 3.3 时间测量仪器	(36)
§ 3.4 低摩擦系统——气垫导轨	(39)
§ 3.5 液体温度计	(40)
§ 3.6 电路元件	(41)
§ 3.7 直流电表	(45)
§ 3.8 常用光学仪器	(49)
§ 3.9 常用光源	(51)
第四章 力学实验	(53)
实验 1 基本测量——长度、质量和物体密度的测定	(53)
实验 2 用自由落体仪测定重力加速度	(61)
实验 3 气垫导轨上滑快的碰撞——动量守恒定律的验证	(66)
实验 4 用三线摆测物体的转动惯量	(71)
实验 5 气垫导轨上滑快的简谐振动	(77)
实验 6 弦振动的研究	(80)
实验 7 光杠杆镜尺法测铜丝的杨氏弹性模量——微小长度变化的测量	(83)
实验 8 用拉脱法测液体的表面张力系数——微小力的测量	(90)
实验 9 用落球法测液体的粘滞系数	(94)
第五章 电磁学实验	(98)
§ 5.0 电学实验操作规则	(98)

实验 10	测绘线性电阻和非线性电阻的伏安特性曲线	(98)
实验 11	用直流单臂电桥测电阻	(101)
实验 12	用双臂电桥测小电阻	(110)
实验 13	用电位差计测量电动势和校正伏特计	(115)
实验 14	温差电偶的定标	(121)
实验 15	灵敏电流计基本特性研究	(124)
实验 16	用模拟法测绘静电场	(129)
实验 17	示波器的使用	(134)
实验 18	用霍尔元件测量磁场	(142)
实验 19	用感应法测量磁场	(146)
实验 20	电容器的充放电	(149)
实验 21	用冲击电流计测电容和高阻	(153)
第六章	光学实验	(159)
§ 6.0	光学仪器的使用与维护	(159)
实验 22	薄透镜焦距的测定	(160)
实验 23	分光计的调节和使用	(166)
实验 24	薄膜干涉	(177)
实验 25	单缝衍射的光强分布	(181)
实验 26	光栅衍射	(184)
实验 27	光的偏振	(187)
第七章	近代物理与综合实验	(192)
实验 28	迈克尔逊干涉仪的调节与使用	(192)
实验 29	微波干涉和布拉格衍射	(197)
实验 30	密立根油滴法测定电子电荷	(201)
实验 31	夫兰克—赫兹实验	(208)
实验 32	氢原子光谱	(214)
实验 33	全息照相	(219)
实验 34	盖革—弥勒计数器和核蜕变的统计规律	(225)
实验 35	用超声光栅测定液体中的声速	(231)
第八章	设计性实验	(235)
§ 8.0	设计性实验简介	(235)
§ 8.1	力学设计性实验	(237)
实验 36	单摆测重力加速度	(237)
实验 37	轻质固体密度的测定	(241)
实验 38	液体密度的测定	(242)
实验 39	气垫导轨上滑块的运动——时间、速度和加速度的测量	(242)

实验 40	用光杆测定固体的线胀系数	(244)
实验 41	测定偏心轮绕定轴的转动惯量	(245)
实验 42	用焦利秤测弹簧的有效质量	(245)
§ 8.2	电磁学设计性实验	(246)
实验 43	变阻器制流特性和分压特性	(246)
实验 44	电表改装和校准	(250)
实验 45	非平衡电桥及热敏电阻温度计	(251)
实验 46	用伏安法测电阻(采用电压补偿测量)	(252)
实验 47	用电位差计测电阻	(252)
§ 8.3	光学设计性实验	(252)
实验 48	测量透明固体与液体折射率	(252)
实验 49	用双棱镜测量钠光波长	(253)
实验 50	用分光计测定液体折射率	(253)
实验 51	观察旋光现象	(253)
第九章	计算机在物理实际问题中的应用设计实验	(255)
§ 9.1	计算机在物理实际问题中的应用概述	(255)
§ 9.2	应用实验设计方案简介	(255)
§ 9.3	非电量电测技术应用简介	(256)
§ 9.4	常用传感器和 A/D、D/A 转换器简介	(258)
§ 9.5	计算机在物理问题中的应用设计实验	(264)
设计实验 52	计算机在光学测量中的应用	(264)
设计实验 53	霍尔开关器件的特性及应用设计	(272)
设计实验 54	温度传感器的特性及应用设计	(275)
设计实验 55	光电传感器的特性及应用设计	(279)
设计实验 56	电阻应变式传感器的特性及应用设计	(279)
设计实验 57	压力传感器特性及应用设计	(283)
设计实验 58	计算机在电磁学测量中的应用	(287)
设计实验 59	计算机在力学测量中的应用	(287)
设计实验 60	计算机在热学测量中的应用	(287)
设计实验 61	计算机在综合测量中的应用	(287)
附录	计算机检测与维修的一般步骤和基本方法	(288)
附录 1	计算机故障诊断处理的一般步骤	(288)
附录 2	计算机故障诊断检查维修(Check Maintaining)的基本方法	(289)
附表	物理学常用数表	(293)
附表 1	基本物理常数	(293)
附表 2	物质的密度	(293)

附表 3 我国部分城市的重力加速度 (294)

附表 4 20 C 时某些金属的杨氏弹性模量 (294)

附表 5 某些物质中的声速 (294)

附表 6 20 C 时与空气接触的液体表面张力系数 (295)

附表 7 不同温度下与空气接触的水的表面张力系数 (295)

附表 8 液体的粘度(粘滞系数) (295)

附表 9 金属和合金的电阻率及其温度系数 (296)

附表 10 物质的折射率 (296)

附表 11 国际单位制 (296)

参考文献 (298)

绪 论

一、物理实验的地位、目的、作用 and 任务

物理学是一门实验科学。通过物理实验,不但可以发现物质的运动规律,而且,从理论上运用逻辑推理获得的物理理论,最终也需通过物理实验来检验认证。

大学物理实验是一门独立的必修基础课程,具有很强的实践性,是工科学生进入大学后,接受系统的实验方法和实验技能训练的开端。大学物理实验与理论教学既相辅相成,又有各自的目的、作用 and 任务。其内容都是物理学中最基础、最重要的。我们要正确处理好理论和实验的关系,重视科学实验,重视进行科学实验训练的实验课教学。

大学物理实验主要目的与任务有以下三个方面。

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培养与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或资料,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。

学生在教师指导下,了解和掌握科学实验的主要过程和方法,通过亲自动手动脑,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题设计、科学研究打下基础。

二、物理实验课的基本程序

1. 实验前的预习(20%)

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与光路图)、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(40%)

首先,进入实验室后,应对照实验设备实物,熟悉仪器及其使用,在实验室规定的条件下安装、调整仪器或连接线路。然后,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,亲自动手动脑,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。

实验过程中随时记入预习报告所列的数据表格中的实验测量数据,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,并在其旁边写上更正数据。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。

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

实验数据需由任课老师审阅,审阅合格后必须经任课教师签字,下次实验时与实验报告一并交于任课老师。同学们需将仪器整理复原后,方可离开实验室。

3. 处理数据并写出完整的实验报告(40%)

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及其全面的分析与总结,因而不等同于预习报告。

实验报告包括以下内容。(a)实验名称、日期、班级、姓名。(b)实验目的与要求。(c)主要仪器的名称、规格、编号。(d)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)。(e)实验简要步骤。(f)数据表格及处理数据。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。根据误差理论,不确定度的表示方法,认真进行数据处理,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。(g)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数据处理中出现的问题,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。这对于培养与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,同学们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,但它又是紧密相关的。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,即进行实验操作,操作中敷衍潦草,甚至为凑数而任意涂改数据或抄袭别人的报告等,都是不允许的。

实验成绩记录,主要以平时每次实验的成绩累计为主、书面的笔试卷为辅(其中,预习占20%、实验动手能力占40%、实验报告或笔试占40%)。

三、物理实验规则

①课前必须预习,写好预习报告,否则,不得进行实验。迟到15分钟以上,不能进实验室继续进行该项实验。

②实验操作前,要了解仪器的构造、性能、使用方法。操作时要严肃认真,自觉爱护仪器设备,未经许可不能擅自挪动或调换它组仪器。实验中,务必注意安全第一,严格遵守操作规则和注意事项。特别对电类实验,必须经教师检查后方可接通电源,以免发生人身或设备事故。

③仪器设备发生故障时,应立即停止使用或断开电源,并立刻报告教师。仪器设备损坏时,要及时报告老师,并填写仪器损坏报告单,事后照价赔偿。特别注意,在实验操作前,仔细检查是否有损坏的仪器设备,并及时报告,以免分清责任。

④实验完毕,需由教师审阅实验数据及预习报告,签名之后,将桌、椅、仪器等,整理复原,经教师许可,方可离开教室。每次实验课,各实验班组均有班长或课代表负责安排两名值日生,配合实验室完成该实验室的仪器复原、环境卫生等工作。

⑤本次实验的报告,在下次上课前,由课代表负责收齐,课前交给任课教师,以便记录成绩。

第一章 误差与数据处理基础知识

§ 1.1 测量误差

一、测量与误差

1. 测量

进行物理实验不仅要观察物理现象,而且要定量测量物理量。所谓测量就是把这个物理量与规定作为标准单位的同类量进行比较,定出它是标准单位的多少倍。

测量又可分为直接测量和间接测量两类。凡是利用量具、量仪经过比较就能直接得到被测结果的叫做直接测量,如用米尺测物体的长度、用天平测物体的质量等。但实验中的大多数物理量没有直接测量的量具,而需要通过若干直接测量,然后利用原理公式通过计算得到测量结果。这种测量称为间接测量。例如,测铜柱密度(实验一)是先测它的高度 L 、直径 d ,然后利用公式 $\rho = \frac{4M}{\pi L d^2}$ 计算得到测量结果。

2. 测量误差

在一定条件下任何一个待测物理量都有一个真值存在。但由于测量仪器、实验条件、人的观察力等因素的存在,得到的测量结果不可能与真值完全一致,测量结果仅仅是待测量的近似值,也就是说测量结果与待测真值之间有一定差异,即误差。

如真值为 μ ,测量值为 N ,则测量的绝对误差 ΔN 可表示为

$$\Delta N = N - \mu \quad (1.1-1)$$

测量误差反映测量值偏离真值的程度,可以取正值,也可以取负值。

评价一个测量结果的准确程度不仅要看误差的绝对大小,还要看它与测量值的相对比例。定义相对误差 E_N ,即

$$E_N = \frac{\Delta N}{N} \times 100\% \quad (1.1-2)$$

用来衡量测量结果的准确程度。

虽然在测量中误差是不可避免的,贯穿于一切测量中,但是,实验者应努力减少各种因素的影响,测出在给定条件下待测量的最佳值,为此就必须研究误差的性质和来源。

3. 误差的种类

根据误差的性质和来源,一般将误差分为系统误差和随机误差两类。

(1) 系统误差

系统误差的特征:在同一条件下多次测量同一物理量时,误差的大小和方向保持恒定,或

在条件改变时,误差大小和方向按一定规律变化。

系统误差产生的主要原因如下:

①仪器误差,这是由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用而造成的,如仪器自身误差以及仪器零点不准、仪器使用时未经校正、在 20℃ 时检定的标准电阻在 30℃ 时使用等;

②附加误差,由于环境的改变,如温度、压强等的变动而引起的误差;

③理论(方法)误差,这是由于计算公式的近似性或实验条件达不到规定要求或测量方法不够完善(如称衡较轻而体积又较大的物体的质量时,没有考虑空气浮力的影响,用伏安法测电阻没有考虑电表内阻的影响等)引起的误差;

④个人误差,由于观测者个人生理或心理习惯与偏向造成的误差,例如,对同一读数有人读总是偏高,而有人读总是偏低。

必须找到系统误差产生的原因,从而设法消除或引入修正值修正测量结果。

(2) 随机误差

随机误差的特征:在同一条件下多次测量同一物理量时,出现的误差时大时小、时正时负,没有确定的规律,但误差服从统计规律。这种误差来源于各种因素的微小扰动,例如环境温度、气压、电场、磁场的微小扰动,读数时对准标志(刻线、指针等)的估读不一致,被测量本身的微小起伏等。

对于随机误差,可采取多次测量取平均值的方法减少影响,但不能消除。

应当指出,把误差分为系统误差和随机误差是为了研究方便,并不是绝对的,二者在一定的条件下可以互相转化。对一些未能掌握的系统误差,可想法使它随机化,用多次测量取平均值抵消部分误差,如米尺不均匀可利用不同位置测量取平均值。反之,随着测量水平的提高,人们对随机变动因素的认识和控制能力的提高,可使随机误差变成系统误差。

以上所说的误差并不包括由于实验者粗心大意造成的误差,例如用了有毛病的仪器,读错、记错和算错数据等。这类错误造成的差错也称为粗大误差或粗差,实验中应该避免。测量中产生了粗大值也应剔除。

一般常用精密度来反映偶然误差的大小,用准确度反映系统误差大小,用精确度反映系统误差与偶然误差的综合效果。精确度又常简称精度。

二、系统误差的发现与对策

系统误差是由仪器、方法和理论等原因产生的。它的大小直接影响实验准确度,因此在实验中应当首先减小它的影响,并应设法校正。

1. 如何发现系统误差

要发现系统误差,就必须仔细研究测量理论和方法的每一步推导,检验或校准每一件仪器,分析每一个实验条件,考虑每一步调整和测量,注意每一个因素对实验的影响等。下面简述几种常用方法。

(1) 实验对比法

实验对比法有实验方法的对比,即用不同方法测同一个量,看结果是否一致;仪器的对比,如用两个电流表接入同一电路对比;改变测量步骤对比,如测某物理量与温度的关系可升温测量与降温测量看读数点是否一致;改变实验中某些参量的数值、改变实验条件以及换人测量等方法进行对比。在对比中如果发现实验结果有差异,即说明实验中存在系统误差。

(2)理论分析法

包括分析实验所依据的理论公式所要求的条件与实际情况有无差异;分析仪器所要求的使用条件是否得到满足等等。

(3)分析数据法

这种方法的理论依据是偶然误差服从一定统计分布规律。如果结果不服从这种规律,则说明存在系统误差。在相同的条件下得到大量数据时可用这种方法。如:按顺序记录的测量数据的偏差是单向或周期性变化,说明存在固定的或变化的系统误差,因为按照偶然误差的统计分布理论,测量值的散布在时间和空间上均应是随机的。

以上只是从普遍的意义介绍了几种发现系统误差的途径,实际工作中,会有许多具体办法。

2. 系统误差的修正和限制

能掌握系统的误差,就能引入修正值修正。例如,对千分尺零点的修正,利用较高级的电表对低级的电表测出修正曲线等。但实际中,有时不易找出确切的系统误差值,也常在测量中设法抵消它的影响。下面介绍几种典型的从测量方法上抵消系统误差的方法。

(1)替代法

在测量装置上对待测量进行测量后,立即用一个标准量替换待测量,再次进行测量,并调整到同样的情况,从而得出与待测量相等的标准量。例如,在天平上称物体质量,如果采用通常测法,即左盘放待测物,右盘放砝码,会把天平两臂不等长的系统误差带入测量值。采用替换法,就可避开这一系统误差。具体方法是:设待测物质量为 x ,先利用中介物 T (例如干净的细砂)与之平衡。若天平两臂长分别为 l_1 和 l_2 ,则平衡时有 $x = (l_2/l_1)T$ 。移去待测物,换之以标准砝码 p 再与中介物 T 达到平衡,则有 $p = (l_2/l_1)T$ 。于是,得 $x = p$ 。

(2)异号法

使误差在实验中出现两次,一次为正值,另一次为负值,取平均值作为测量结果,以消除系统误差。例如,用霍尔元件测磁场时改变磁场方向,进行两次测量取平均以消除霍尔元件测电压引线焊点不对称引起的系统误差。

(3)对换法

在测量中将某些因素对换(如位置),造成系统误差变化,通过计算减小或消除系统误差。例如:用滑线式惠斯通电桥测电阻时,把待测电阻交换位置再次测量,取两次测量值的平均值,就可减少滑线电阻丝不均匀引起的误差。

(4)对称观测法

若有随时间线性变化的系统误差,可将观测程序对某时刻对称地再做一次。例如,一只灵敏电流计零点随时间线性漂移,在测量读数前记下一次零点值,测量读数后再记一次零点值,取两次零点值的平均来修正测量值。又如,测电阻温度系数的实验,测电阻前记录一次温度,测电阻后再记录一次温度,取两次平均值作为该点温度。

由于很多随时间变化的误差在短时间内均可认为是线性变化,因此对称观测法是一种能够消除随时间变化的系统误差的好方法。

以上仅仅列举了几种减小或消除某些简单系统误差的方法。实际上,出现系统误差常常是由于实验所用的理论不完善或理论背后还隐藏着未被发现某些规律。系统误差的出现促使人们去深入研究、发现新的更精细的规律。

三、随机误差的统计规律及表示

1. 随机误差的统计规律

理论与实践都证明：在多数情况下，随机误差服从正态分析，也叫高斯分布。

为研究随机误差的高斯分布，首先，介绍概率（即几率、或然率）的定义。

对某物理量测量 n 次，某种误差 δ_i 出现 n_i 次，则称比值

$$\frac{n_i}{n} = p_i \quad (1.1-3)$$

为误差 δ_i 出现的概率。

由于绝对值很大的误差，出现的概率为 0，即误差有界。所以，当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时，误差取值趋向于连续。

若在误差分布的范围内，取一个确定的区间 (δ_1, δ_2) ，则误差落入此区间（即在此区间出现）的概率也是一个定值。区间不同，概率也随之不同。

误差落入单位区间的概率为：

$$f(\delta) = \frac{d\rho}{d\delta} \quad (1.1-4)$$

称为概率密度。

概率密度 $f(\delta)$ 是误差 δ 的函数。若概率密度函数 $f(\delta)$ 已知，落入小区间 $\Delta\delta$ 的概率为

$$\rho = \int d\rho = \int f(\delta) d\delta \quad (1.1-5)$$

根据误差理论：随机误差的正态分布函数为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.1-6)$$

$$\delta = \Delta x = x - \mu \quad (1.1-7)$$

其中， x 表示测量值， μ 表示真值， δ 为测量值的随机误差， σ 是与真值 μ 有关的常数，我们把 σ 称为标准差。

正态分布函数 $f(\delta)$ 的曲线，如图 1.1-1 所示。

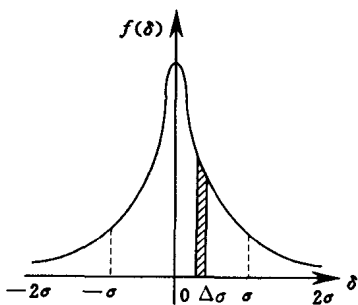


图 1.1-1 高斯分布

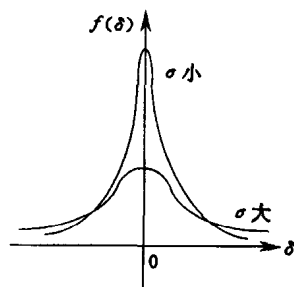


图 1.1-2 高斯分布与 σ 的关系

曲线下面积为 1，代表各种测量误差出现的总概率。

$\Delta\delta$ 区间的面积元 $f(\delta)\Delta\delta$ 表示测量值的误差出现在 $\delta \sim \delta + \Delta\delta$ 范围内的概率。

从分布曲线可以看出：正态分布具有单峰性、对称性、有界等特点。因此，在测量中就有：

①绝对值小的误差，出现的概率大，并且误差有界；

②大小相等、符号相反的误差，出现的概率相等。随着测量次数的增多，随机误差的平均值趋于 0。若测量次数 $n \rightarrow \infty$ ，则随机误差服从高斯分布。

实际测量中，只要测量次数足够多，随机误差也近似服从高斯分布。

2. 标准误差 σ 与极限误差

对一个物理量进行 n 次测量，测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，则 σ 的数学表达式

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (1.1-4)$$

σ 称为方均根误差或标准误差，表示测量的精密程度。 σ 大随机误差离散大，测量精密度低； σ 小随机误差离散小，测量精密度高，如图 1.1-2 所示。

通过计算可得，对任意一次测量，随机误差落在区间 $[-\sigma, \sigma]$ （即测量值落在 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 区间）的概率为 68.3%。这也表示对于测量值 x_i 邻近区间 $[x_i - \sigma, x_i + \sigma]$ 包括真值的概率为 68.3%。这就提供了一个用概率表示误差的方法，即真值在任一测量值的误差区间 $[-\sigma, \sigma]$ 的概率为 68.3%。这种概率称为置信概率，其误差区间称为置信区间。同样可知误差在 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 置信区间的置信概率为 95.4%，在 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 区间的置信概率为 99.7%。因此只要给出测量结果在一定置信概率下的置信区间就表达出了测量结果的精密程度。

$[-3\sigma, 3\sigma]$ 置信区间的置信概率为 99.7%，表明测量值的随机误差超过 $\pm 3\sigma$ 的概率仅为 0.3%，即一千次测量只有三次。在一般几十次测量中几乎不可能出现，所以将 3σ 称为极限误差。一般实验中误差 $|\Delta x| > 3\sigma$ 的测量值被认为是粗值，应予剔除。

3. 有限次测量的平均值与标准偏差

(1) 算术平均值——真值的最佳近似值

由于随机误差的对称性和补偿性，在条件不变的重复测量中，随着测量次数的增多，随机误差的平均值趋向于零。即当 $n \rightarrow \infty$ 时，有

$$\frac{1}{n} \sum (x_i - \mu) = \frac{1}{n} \sum x_i - \mu \rightarrow 0$$

所以

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

即无限多次重复测量平均值趋向于真值。在有限次测量中，只要测量次数足够多，算术平均值就是真值的最佳近似。所以在多次重复测量中以测量值的平均值代替真值。

(2) 标准偏差

实际测量中测量次数有限，被测量真值未知，标准误差无法计算。可以证明，标准误差的最佳估计值为

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.1-5)$$

S_x 称为标准偏差，公式(1.1-5)称为贝塞尔公式。

① 为书写简便，以下将 $\sum_{i=1}^n$ 简化记为 $\sum$ ，如 $\sum_{i=1}^n x_i$ 简记为 $\sum x_i$ 。