



普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理实验

第3版

DAXUE WULI SHIYAN

张旭峰 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理实验

第3版

主 编 张旭峰
副主编 王志斌
参 编 董建会 高永全



机械工业出版社

本书是中北大学物理实验教学中心全体教师多年教学实践经验和教学成果的结晶。本书较系统地介绍了大学物理实验中测量误差、不确定度及数据处理的基本知识,收入了力学、热学、电磁学、光学和近代物理学实验共49个。全书共八章:测量误差和数据处理基本知识、力学实验、热学实验、电磁学实验、光学实验、近代物理及综合性和应用性物理实验、设计性实验、基本实验方法与测量方法。每个实验简要介绍了实验原理、实验仪器装置和实验内容,并附有思考题,为教学和学生自主学习提供了方便。

本书为高等学校理工科各专业的物理实验教材或教学参考书,也可作为物理实验技术人员和相关课程教师的参考用书和其他读者的自学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 张旭峰主编. —3版. —北京:机械工业出版社, 2016.8

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-54546-0

I. ①大… II. ①张… 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(2016)第190747号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李永联

责任编辑:李永联 任正一

责任校对:张薇 樊钟英 封面设计:马精明

责任印制:李洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2016年8月第3版·第1次印刷

184mm×260mm·19印张·460千字

标准书号:ISBN 978-7-111-54546-0

定价:36.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

本书是根据教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),结合中北大学具体情况,在以前自编的《大学物理实验》(2003年)和《大学物理实验》第2版(2013年)的基础上修订而成。

全书共八章。第1章比较系统地介绍了误差和不确定度的概念及其计算方法,对有效数字、数据处理初步方法等也做了介绍。本章内容在本课程中占有重要地位,它是学生进行实验和处理数据的基础。第2章~第7章共收入力学、热学、电磁学、光学与近代物理学实验及设计性实验等49个。

结合高等理工院校大学物理实验课程的改革趋势,我们在实验选题上力求题目典型、内容丰富,以使学生在有限的学时内较快地提高实验技能。基于大学物理实验课的教学特点,为了便于学生学习和教师教学,我们在编写时努力做到:实验目的明确,实验原理叙述清楚,实验内容安排得当,实验步骤简洁明了。

近年来,大学物理实验课程同其他课程一样,进行着教学内容、教学方法的改革,在这样一种背景下,我们实验中心研制了多种教学仪器,改造了若干实验,增添了几个综合型、应用型的实验,力求反映当前主流的实验理论、实验技术和方法,这在一定程度上更新、充实了本书的内容。

参加本书编写工作的有张旭峰(编写绪论、第1章、第2章、第3章)、王志斌(编写第4章、第5章)、董建会(编写第6章)、高永全(编写第7章、第8章)。

实验教学是一项集体事业,无论是实验教材的编写,还是实验项目的开设准备,都凝聚着全体实验教师和技术人员的智慧和劳动成果。在本书的编写过程中,广泛参阅了兄弟院校的有关教材,吸收了其中富有启发性的观点和优秀内容,在此表示衷心的感谢。

何迪和教授、刘宪清教授细致地审阅了全部书稿,提出了许多中肯的建议和修改意见,在编写本书的过程中,实验室的所有同志也给予了我们很大帮助,在此一并表示衷心的感谢。

编者恳切希望使用本书的教师、学生和其他读者提出宝贵意见,以便于今后再版时修订。

编 者

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第1章 测量误差和数据处理

基本知识	4
------------	---

1.1 测量误差	4
1.2 发现和消除系统误差的方法	7
1.3 对实验随机误差处理的基本知识	8
1.4 直接测量的实验数据处理	12
1.5 间接测量的结果和不确定度的综合	16
1.6 用作图法处理实验数据	18
1.7 最小二乘法直线拟合	18
1.8 我国的法定计量单位	20

第2章 力学实验

2.1 长度测量器具	24
2.2 质量测量仪器	31
2.3 时间测量仪器	33
实验1 测固体的平均密度	35
实验2 自由落体运动实验	39
实验3 用单摆法测重力加速度	43
实验4 转动惯量的测量	45
实验5 弹性模量的测定	52
实验6 受迫振动的研究	64

第3章 热学实验

3.1 量热器	71
3.2 温度测量仪器	72
3.3 干湿球湿度计	75
3.4 气压计	76
实验7 热膨胀系数的测量	77
实验8 声速的测量	80

实验9 用落球法测液体的动力黏度	84
------------------------	----

实验10 气体比热容比的测定	87
----------------------	----

第4章 电磁学实验

4.1 电源	91
4.2 标准电池	92
4.3 电阻器	93
4.4 开关	97
4.5 直流电表	97
4.6 数字电表	103
4.7 万用电表	103
实验11 电表的改装及其校准	108
实验12 用惠斯顿电桥测电阻	112
实验13 用开尔文电桥测低电阻	117
实验14 用滑线式电位差计测电池的电动势及内阻	123
实验15 用箱式电位差计测量热电偶的温差电动势	128
实验16 用数字式冲击电流计测量互感	133
实验17 用数字式冲击电流计测量电容和高电阻	136
实验18 模拟示波器基础实验	138
实验19 霍尔效应及其应用	146
实验20 用数字式示波器测软磁材料的磁滞回线	150

第5章 光学实验

5.1 光学仪器的使用和注意事项	155
5.2 消视差调节	156
5.3 常用光源	156
5.4 分光仪的调节和使用	158
5.5 读数显微镜	163

实验 21 薄透镜焦距的测量	165	实验 40 太阳能电池的特性测量	256
实验 22 等厚干涉实验	170	实验 41 用非平衡电桥研究热敏电阻的温 度特性	259
实验 23 测三棱镜材料的折射率	173	实验 42 黑体辐射规律的研究	265
实验 24 光栅实验	178	实验 43 扫描隧道显微镜	274
实验 25 偏振光的研究	183	实验 44 原子力显微镜实验	277
实验 26 迈克耳孙干涉仪	190	实验 45 真空的获得与真空镀膜	281
实验 27 用干涉法测空气的折射率	197	第 7 章 设计性实验	288
实验 28 数码相机照相实验	200	实验 46 将微安表改装为多量程 电流表并进行初校	288
第 6 章 近代物理及综合性和 应用性物理实验	204	实验 47 用 UJ31 型电位差计测量 毫安表的内阻	288
实验 29 用光电效应法测定 普朗克常量	204	实验 48 用 UJ31 型电位差计校准 毫安表	288
实验 30 密立根油滴实验	210	实验 49 用劈尖膜干涉测量 细丝直径	289
实验 31 光谱的拍摄及谱线 波长的确定	215	第 8 章 基本实验方法与 测量方法	290
实验 32 全息照相实验	220	8.1 比较法	290
实验 33 RLC 串联电路暂态 过程的研究	225	8.2 补偿法	291
实验 34 夫兰克-赫兹实验	230	8.3 放大法	291
实验 35 光纤光学与半导体激光器 的电光特性	235	8.4 模拟法	292
实验 36 电阻应变式传感器 及其应用	238	8.5 转换测量法	293
实验 37 差动变压器	245	参考文献	295
实验 38 电容式传感器的 位移实验	249		
实验 39 调相型磁通门实验	251		

绪 论

1. 物理实验的意义

物理学研究的是自然界物质运动的最基本最普遍的规律和形式。物理学是自然科学和工程技术的基础。物理学本身是一门以实验为基础的学科。物理学研究方法通常是在观察和实验的基础上,对物理现象进行分析、抽象和概括,找出各物理量之间的数量关系及它们变化的规律,从而建立物理定律,形成物理理论,再不断地回到实验中去经受检验。如果出现了新的实验事实与该理论相违背,那么便需要修正原有的物理定律和物理理论。因此我们说,物理实验是物理理论的基础,也是理论正确与否的“试金石”。

实验是人们研究自然规律、改造自然的基本手段之一。科学越进步,科学实验就显得越重要。任何一种新技术、新材料、新工艺和新产品,都必须通过科学实验才能获得。作为研究自然界物质运动最普遍形式的手段的物理实验,在科学实验中充当着“铺路石”的作用。

目前,人类社会已进入高科技时代。高科技是知识与技术的集成,而高科技的竞争最终是人才的竞争。培养高素质的人才,是当今世界面临的共同课题。社会需要既有丰富理论知识,又有扎实的实验技能的全面发展的人才。基于上述原因,人们愈来愈深切地感到在理工院校加强对学生进行物理实验训练的重要性。于是,物理实验就从原来的物理课程中分离出来,形成了一门独立的课程。“大学物理实验”和“大学物理”两门课程具有同等重要的地位。理论课是进行物理实验的必要基础,在实验课过程中,通过理论的运用与现象的观测和分析,又可进一步加深对物理理论的理解,甚至会发展新的理论。

2. 物理实验课程的目的与任务

物理实验课是对高等理工科学校学生进行科学实验基本训练的基础课程。它将使学生得到系统的实验方法和实验技能的训练,了解科学实验的主要过程和基本方法,为日后的科学实验活动奠定初步基础。同时它的思想方法、教学方法及分析问题与解决问题的方法也将对学生的智力发展大有裨益。整个教学活动的进行也将有助于学生的作风、态度及品德的培养和素质的提高。

物理实验课程的具体任务是:

(1) 通过对实验现象的观测分析,学习物理实验知识,加深对物理学原理的理解。

(2) 培养与提高学生的科学实验能力,其中包括:

- 1) 自行阅读实验教材,做好实验前的准备。
- 2) 熟悉常用仪器的原理与性能,掌握正确的使用方法。
- 3) 正确测量、记录与处理实验数据,撰写合格的实验报告。
- 4) 运用物理学理论知识对实验现象和结果进行分析与判断。
- 5) 能够完成简单的设计性实验。

(3) 培养与提高学生的科学实验素养 要求学生具备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、主动研究的探索精神和遵守纪律、爱护公物的优良品德。

3. 怎样做好物理实验

(1) 物理实验课的三个重要环节 上实验课与听理论课不同,它的特点是学生在教师的指导下自己动手,独立地完成实验任务。通常,一次完整的实验课要经历三个阶段。

1) 预习:这是做实验的准备工作。应通过阅读实验教材明确本次实验所要达到的目的,以此为出发点,弄明白实验所依据的理论,所采用的实验方法;搞清控制实验过程的关键与必要的实验条件;明确实验内容和步骤;知道应如何选择、安排和调整仪器;预料实验过程中可能出现的问题等,在此基础上写出实验预习报告。

预习的好坏至关重要,它将决定能否主动顺利地进行实验。

2) 实验:①认真听讲,进一步明确实验原理和条件,弄清为何如此安排实验、如此规定操作步骤,观察教师如何使用仪器,清楚实验中的注意事项。②认真调节好仪器,仔细观察实验现象,准确测量实验数据。③正确地记录数据:正确地设计出数据表格,正确地判断数据的科学性,如实地、清楚地记录下全部原始实验数据和必要的环境条件、仪器的名称、型号与规格、实验现象等。

实验环节是物理实验课的中心,内容丰富而生动。要求学生主动研究、积极探索,充分发挥主观能动性,这样才能获得良好的效果。

3) 实验报告:它是实验结果的文字报道,是实验过程的总结。写好实验报告要求掌握正确的数据处理方法,有根据地进行误差分析,正确地表示出测量结果,并对结果做出合乎实际的说明与讨论,同时回答思考题等。

书写出一份字迹清楚、版面整洁、文理通顺、图表正确、数据完备、结果明确的实验报告是对学生的基本要求。

(2) 严格基本训练,培养实验技能 扎实的基础实验训练是成才的基本功。“冰冻三尺,非一日之寒”,系统严格的训练凝结在每次实验的每个环节、每个步骤之中。实验中应多观察、多动手、多分析、多判断,反对机械操作、反对侥幸心理、反对盲目地进行实验。

实验不能仅满足于测几个数据。要充分利用实践机会来培养自己的动手能力,可以通过重复实验、改变实验条件或参量数值或做对比分析来判断测量结果的正确性;遇到困难或数据超差,不要一味埋怨仪器不好或简单重做一遍或产生急躁心理,而要认真分析,找出原因,纠正错误,把实验做好。

物理实验课中要做的实验大都是经典的传统实验,集中了许多科学实验的训练内容,每个实验都包括一些具有普遍意义的实验知识、实验方法和实验技能。实验以后,应进行必要的归纳总结,提高自己驾驭知识的能力。例如归纳出不同实验中体现出来的基本实验方法——比较法、放大法、补偿法、模拟法及转换测量法,或结合对每个实验的分析、讨论及对思考题的探讨,搞清楚某种实验方法在具体运用时的优点及条件等。

4. 怎样写实验报告

为更好地达到教学目的,完成教学任务,我们将实验报告分为预习报告、实验记录和课后报告三部分。实验报告一律要求用统一的实验报告纸书写。

(1) 预习报告的内容

- 1) 实验名称
- 2) 实验目的、要求
- 3) 实验原理 包括：简要的实验理论依据，实验方法，主要计算公式及公式中各量的意义，关键的电路图、光路图和实验装置示意图，注意事项等。有些实验还要求写出自拟的实验方案，自己设计的实验线路，选择的仪器等。
- 4) 实验步骤：扼要地说明实验的内容、关键步骤及操作要点。
- 5) 数据表格
- 6) 预习思考题：预习报告在上课前交教师审阅，经教师认可后方可做实验。

(2) 实验记录 这一部分在实验课上完成。内容包括：

1) 主要实验仪器的编号和型号规格的记录 记录仪器编号是一个好的工作习惯，便于日后必要时对实验进行复查。

2) 实验内容与观测到的实验现象。

3) 实验数据 数据记录应做到整洁清晰而有条理，最好采用列表法。在标题栏内要注明单位。数据不得任意涂改。确实测错而无用的数据，可在旁边注明“作废”字样，不要任意划去。

实验结果出来后要让教师签字认可，方可将仪器整理还原。

(3) 课后报告

1) 数据处理：包括计算公式，简单计算过程，作图，不确定度估算，最后测量结果等。

2) 完成教师指定的思考题。

3) 附注：对实验中出现的问题进行说明和讨论，以及实验心得或建议等。

预习报告、实验记录和课后报告构成一份完整的实验报告。

5. 遵守实验室规则

为保证实验正常进行，以及培养严肃认真的学习作风和良好的实验工作习惯，学生应遵守以下实验规则：

(1) 学生应在课表规定的时间内进行实验，不得无故缺席或迟到。实验时间若要更动，须经实验室同意。

(2) 学生在每次实验前对排定要做的实验应进行预习，并做预习报告。

(3) 进入实验室后，应检查自己使用的仪器是否有短缺或损坏，若发现问题，应及时向教师或实验员提出。

(4) 实验前应细心观察仪器构造，操作时应谨慎细心，严格遵守各种仪器仪表的操作规则及注意事项。尤其是电学实验，线路接好后先经教师或实验员检查，全部无误后方可接通电源，以免发生意外。

(5) 实验不合格或请假缺课的学生，由教师登记，通知学生在规定时间内补做。

(6) 实验时应注意保持实验室整洁、干净。实验完毕应将仪器、桌椅恢复原状，放置整齐。

(7) 实验室内严禁大声喧哗、随意乱搬仪器等。

(8) 如有损坏仪器应及时报告教师或实验员，并填写损坏单，说明损坏原因。赔偿办法根据实验室规定处理。

第 1 章 测量误差和数据处理基本知识

本章介绍测量误差和实验数据处理的一些初步知识，这些知识是进行科学实验时所必需的和最基本的。对这些知识的详尽论述需要概率论与数理统计等若干后续课程的基础理论。本书只直接引用所需的一些基本概念、必要的计算公式和有关的结论，希望学生在物理实验过程中通过实际应用逐步理解其物理意义和初步掌握其正确用法。对这门知识的进一步掌握有待后续的有关理论课程和其他实践性课程去逐步解决。

1.1 测量误差

1.1.1 测量

为确定待测量的量值而进行的实验过程称为测量。测量可分为以下两大类：

1. 直接测量

不必对与待测量有函数关系的其他量进行测量，而能直接得到该待测量的量值的测量过程称为直接测量。如用天平称物体的质量，用电桥测电阻器的电阻值等。

2. 间接测量

通过对与待测量有函数关系的其他量的测量，以得到该待测量之量值的测量过程称为间接测量。如需测一球的密度，先分别测量该球的质量 m 和直径 d ，然后按公式 $\rho = 6m/(\pi d^3)$ 算出该球的密度 ρ 。

任何测量结果都难免含有误差。分析测量过程中可能产生哪些误差，如何减少或消除其影响，并对测量结果中未能消除的误差做出估计等，这些工作是在科学实验中必做的。因此，我们必须了解误差的基本概念、主要误差的基本特性和对误差范围进行估计的初步知识。

1.1.2 误差定义

1. 绝对误差

某量之测量值的绝对误差定义为该量的测量值与其客观真实值之差，即

$$\text{绝对误差} = \text{测量值} - \text{真值} \quad (1-1)$$

上式中的真值，是在测量时该量本身客观存在的真实量值。对此，有两点值得特别注意：

其一，由于任何事物都处在发展变化之中，上述定义式中之真值应是该量被测时它所具有的真值。

其二，在测量过程中，被测量的真值往往因受测量仪器的作用而发生变化，这种变化有时不容忽视，应设法避免。

由于上述定义式中选择了被测量的真值作为客观标准，故该误差是这个测量值的真误差。

在实际工作中需用到“修正值”概念，其定义为

$$\text{修正值} = \text{真值} - \text{测量值} \quad (1-2)$$

则

$$\text{真值} = \text{测量值} + \text{修正值}$$

2. 相对误差

为便于描述和比较不同测量结果的准确程度而引用相对误差概念，其定义为

$$\text{相对误差} = \text{绝对误差} \div \text{真值} \quad (1-3)$$

3. 引用误差

引用误差是一种简化和实用的相对误差，常用于表示计量器具准确程度的等级。其定义为：仪器示值的绝对误差与其测量范围的上限值（或量程）之比值，以百分数形式表示。

1.1.3 误差的主要来源

误差主要来自以下几个方面：

1. 设备误差

由于所用仪器本身的示值不准而带来的误差。

2. 环境误差

由于测量过程中周围环境状况与要求的标准状态不一致所引起的误差。

3. 调整误差

测量时没有将仪器调整到其正确使用状态所造成的误差。

4. 方法误差

测量方法不完善而导致的误差。

1.1.4 误差分类

根据误差的性质，人们将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。

1. 系统误差

在偏离规定的测量条件下多次重复测量同一量时，误差的绝对值和符号保持恒定；或在该测量条件改变时按某一确定的规律变化的误差，统称为系统误差。

(1) 已定系统误差 其符号和绝对值已知或其变化规律已经确定的系统误差称为已定系统误差。已定系统误差可以通过修正消除。

(2) 未定系统误差 其符号和绝对值未知的系统误差，称为未定系统误差。实验时，应设法估计该误差的范围。

2. 随机误差

在实际测量条件下，多次重复测量同一被测量时，误差的绝对值和符号以不可预知的方式变化着的误差称为随机误差。

3. 粗大误差

超出规定条件下之预期范围的误差称为粗大误差，有时简称为粗差。

在处理数据时，含有粗大误差的测量值会显著歪曲测量结果，所以允许剔除少量含有这种粗大误差的异常测量值。

应该注意误差的性质可以在一定的条件下相互转化。在实际测量中，人们往往利用这一特性以减小实验结果的误差。例如，当实验条件稳定且系统误差可掌握时，就尽量保持在相

同条件下做实验,以便能通过修正消除该系统误差;当系统误差未能掌握时,就可以采取“随机化技术”,如按某种方式改变某一测量条件使系统误差随机化,使其有一部分能被抵偿掉。

1.1.5 精密度、正确度、准确度及不确定度

评价测量结果,常用到精密度、正确度和准确度这三个概念。这三者的含义不同,使用时应注意加以区别。

1. 精密度

反映随机误差大小的程度。它是对测量结果的重复性的评价。精密度高是指测量的重复性好,各次测量值的分布密集,随机误差小。但是,精密度不能确定系统误差的大小。

2. 正确度

反映系统误差大小的程度。正确度高是指测量数据的算术平均值偏离真值较少,测量的系统误差小。但是,正确度不能确定数据分散的情况,即不能反映随机误差的大小。

3. 准确度

反映系统误差与随机误差综合大小的程度。准确度高是指测量结果既精密又正确,即随机误差与系统误差均小。

现以射击打靶的弹着点分布为例,形象地说明以上三个术语的意义。图 1-1a 表示精密度高而正确度低;图 1-1b 表示正确度高而精密度低;图 1-1c 表示精密度和正确度均低,即准确度低;图 1-1d 表示精密度和正确度均高,即准确度高。通常所说的“精度”含义不明确,应尽量避免使用。

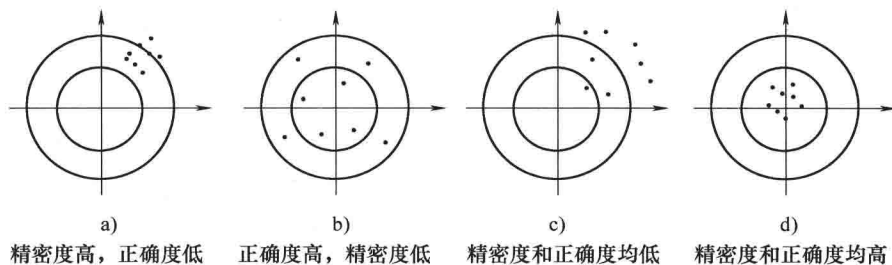


图 1-1 精密度、正确度和准确度示意图

4. 不确定度

表征被测量的真值所处量值范围的评定。用测量结果附近的一个范围表示,它表示被测量的真值难以确定的一个大约的数值范围。

测量结果的不确定度一般包含好几个分量,这些分量可以按估计其数值的方法归并成 A、B 两类:

A 类不确定度分量是用统计方法计算的分量,根据测量结果的统计分布进行估算,可用估计的标准偏差 s_i 表示。

B 类不确定度分量是用其他方法来估算的分量,可用等效的标准偏差 u_j 作为其估计值。

1.2 发现和消除系统误差的方法

对仪器进行计量校准是发现其系统误差最行之有效的办法,同时还可以确定其修正值。此外,从改善测量方法和实验数据处理方法入手,也可以找到多种发现和消除系统误差的方法,其中有些方法既简单且行之有效,现简述如下。

1.2.1 理论分析法

这是通过分析实验方法所依据的理论公式是否严密或实验条件与该理论公式所要求的条件是否符合,来检查是否存在系统误差的方法。如根据单摆周期的近似公式 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ 测重力加速度 g , 则从理论分析可知该结果含有多项系统误差,且从理论上可逐项推导出近似的修正公式。

1.2.2 替换法

这是用测量仪器测量某一被测量之后,用标准量代替被测量,在完全相同的测量条件下调节标准量使仪器重新回到刚才测该被测量时相同的状况的方法。此时,和标准量的量值对比可检验仪器是否存在系统误差,并可用来修正测量结果。如用电桥测某一电阻,得到一个测值 R 。使电桥所有旋钮的位置保持不变,用标准电阻箱代替被测电阻,调节电阻箱的阻值使电桥重新达到平衡。此时电阻箱的示值即可作为该被测电阻的准确值,而它与电桥示值 R 之差就可作为电桥对该测值的修正值。

1.2.3 异号法

这是改变某一测量条件使误差在测量过程中一次出现为正值,另一次为负值,取两次测值的平均值以消除或减小该误差的方法。如用冲击电流计测互感时,实验中改变冲击电流的方向进行测量,可以消除测量回路中的温差电动势对测量结果的不良影响。

1.2.4 交换法

如欲检查天平是否等臂,称量时可将被测物与砝码交换位置称量,可发现并消除天平不等臂误差对该测量结果的影响。

1.2.5 实验数据分析法

如将实验测量数据按测量的时间顺序排列,观察其数值的变化规律,可发现随时间有规律地变化的系统误差。

1.2.6 仪器自检法

这是在测量某一被测量时,有目的地改变实验的某项参数,观察测量结果的变化规律的方法。如用冲击电流计测某一电容时,选取不同的充电电压进行测量,考查测量结果的变化规律,以检查冲击电流计是否存在随电量而变的系统误差。

1.2.7 半周期观测法

对于周期性变化的误差,可每隔半个周期进行偶数次观测。如分光仪刻度盘偏心带来的测角误差以 360° 为周期变化,测量时采用相距 180° 的两个游标同时进行测量,则被测的角位移值等于两个游标测出的角位移的平均值。因此,这种测量法又称为对径测量法。

1.2.8 随机化处理法

如用读数显微镜测微小间距。由于读数显微镜的丝杠在加工时存在随机误差,即有些螺距偏大,有些螺距偏小,而且这种偏差的分布是随机的。对于任一给定的丝杠,在其任一给定位置,螺距的偏差是固定的,但一般是未知的,即属于未定系统误差。采用丝杠的不同部位测量时具有不同的系统误差,由于这种系统误差的分布具有随机性,所以取这些测值的平均值时,这些系统误差将彼此抵消一部分。

1.3 对实验随机误差处理的基本知识

1.3.1 随机误差的分布

实验中随机误差的出现对于单次测量而言是没有确定的规律的,误差的符号和绝对值的大小都不能预知。但对同一被测量多次重复测量时,则能发现这些测值的随机误差是按一定的统计规律分布的。在普通物理实验中出现的随机误差,其中有许多近似地服从“正态分布”的规律。这种分布的主要特点是:

1) 绝对值小的误差出现的机会多,绝对值大的误差出现的机会少。在正常情况下绝对值很大的误差几乎不会出现,即分布具有“单峰性”和“有界性”。

2) 正的误差和负的误差出现的机会大致相等,而且显示出分布具有“对称性”,重复测量的次数越多,这种对称性越显著。

因此,对一个稳定的被测量多次重复测量取其算术平均值时,这类随机误差将彼此大致相消。

1.3.2 标准误差与标准偏差

实验中随机误差不可避免,也不可能完全消除。但是,可以根据随机误差的理论来估算其大小。为了简化起见,在下面讨论随机误差的有关问题中,假设系统误差已经减小到可以忽略的程度。

采用算术平均值作为测量结果可以削弱随机误差。但是,算术平均值只是真值的估计值,不能反映各次测量值的分散程度。采用标准误差来评价测量值的分散程度则既方便又可靠。对物理量 x 进行 n 次测量,其标准误差(标准差)定义为

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

式中, x_0 为被测量的真值。

在实际测量中,测量次数 n 总是有限的,而且真值也不可知,因此,标准误差只有理论

上的价值。对标准误差 $\sigma(x)$ 的实际处理只能进行估算。估算标准误差的方法很多,最常用的是贝塞尔法,它用实验标准(偏)差 s_x 近似代替标准误差。实验标准差 s_x 的表达式为

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

式中, $\bar{x}$ 为 n 次测量值的算术平均值。

设对某一被测量进行了 n 次独立的重复测量,得到 n 个测值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。

1) 求出这组测值的算术平均值 $\bar{x}$

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n = \sum x_i / n \quad (1-6)$$

在本书的数学表达式中一般省略掉求和号上的求和范围。

2) 本组测值中任一测值与平均值之差称为残余误差,简称为残差,用 Δx_i 表示。逐个求出各个残差

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1-7)$$

3) 用贝塞尔公式计算标准偏差的估计值 s_x

$$s_x = \sqrt{\sum (\Delta x_i)^2 / (n-1)} = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)} \quad (1-8)$$

人们往往将 s_x 也称为标准偏差。从上式可见,若 s_x 值大,则表明这组测值彼此分散的程度大,即精密度低。

注意:若被测量的量值是稳定的,则 s_x 表征的是所用测量仪器的重复性,即仪器的精密度。若所用测量仪器足够精密,而被测量是变动的,则 s_x 表征的是被测量的波动性或稳定性,即反映被测量值波动大小的程度。

1.3.3 平均值的标准偏差

如上所述,在我们进行了有限次测量后,可得到算术平均值 $\bar{x}$, $\bar{x}$ 也是一个随机变量。在完全相同的条件下,多次进行重复测量,每次得到的算术平均值也不尽相同,这表明,算术平均值本身也具有离散性。由误差理论可以证明算术平均值的标准偏差为

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2} \quad (1-9)$$

由此式可以看出,平均值的标准偏差比任一次测量值的标准偏差小。增加测量次数,可以减少平均值的标准偏差,提高测量的准确度。但是,单纯凭增加测量次数来提高准确度的作用是有限的。如图 1-2 所示,当 $n > 10$ 以后,随测量次数 n 的增加, $s_{\bar{x}}$ 减小得很缓慢。所以,在科学研究中测量次数一般取 10 ~ 20 次,而在物理实验教学中一般取 6 ~ 10 次。

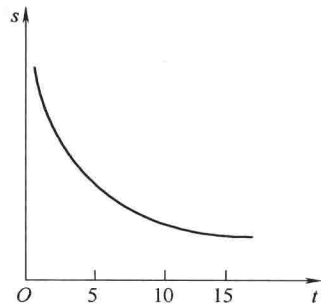


图 1-2 测量次数对 $s(\bar{x})$ 的影响

1.3.4 随机误差的正态分布规律

随机误差的分布是服从统计规律的。首先,我们用一组测量数据来形象地说明这一点。例如用数字毫秒计测量单摆周期,重复 60 次 ($n=60$),将测量结果统计如表 1 所示。

表 1 单摆周期测量结果统计

时间区间/s	出现次数 Δn (频数)	相对频数 $\frac{\Delta n}{n}$ (%)	时间区间/s	出现次数 Δn (频数)	相对频数 $\frac{\Delta n}{n}$ (%)
2.146 ~ 2.150	1	2	2.166 ~ 2.170	15	25
2.151 ~ 2.155	3	5	2.171 ~ 2.175	9	15
2.156 ~ 2.160	9	15	2.176 ~ 2.180	5	8
2.161 ~ 2.165	16	27	2.181 ~ 2.185	2	3

以时间 t 为横坐标, 相对频数 $\frac{\Delta n}{n}$ 为纵坐标, 用直方图将测量结果表示为如图 1-3 所示。如果再进行一组测量 (如 100 次), 作相应的直方图, 仍可以得到与前述图形不完全吻合但轮廓相似的图形。随着次数的增加, 曲线的形状基本不变, 但对称性越来越明显, 曲线也趋向光滑。当 $n \rightarrow \infty$ 时, 上述曲线变成光滑曲线。这表示, 测值 t 与频数 $\frac{\Delta n}{n}$ 的对应关系呈连续变化的函数关系。显然, 频数与 t 的取值有关, 连续分布时它们之间的关系可表示为

$$\frac{dn}{n} = f(t) dt \quad (1-10)$$

函数 $f(t) = \frac{dn}{ndt}$ 称为概率密度函数, 其含义是在测值 t 附近, 单位时间间隔内测值出现的概率。

当测量次数足够多时, 其误差分布将服从统计规律。在许多物理测量中, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 随机误差 ε 近似服从正态分布 (或称高斯分布) 规律。可以导出正态分布概率密度函数的表达式为

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}} \quad (1-11)$$

图 1-4 是正态分布曲线。该曲线的横坐标为误差 ε , 纵坐标 $f(\varepsilon)$ 为误差分布的概率密度函数。 $f(\varepsilon)$ 的物理含义是: 在误差值 ε 附近, 单位误差间隔内, 误差出现的概率。曲线下阴影的面积元 $f(\varepsilon) d\varepsilon$ 表示误差出现在 $\varepsilon \sim \varepsilon + d\varepsilon$ 区间内的概率。按照概率理论, 误差 ε 出现在区间 $(-\infty, \infty)$ 范围内是必然的, 即概率为 100%。所以, 图中曲线与横轴所包围的面积应恒等于 1, 即

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\varepsilon) d\varepsilon = 1 \quad (1-12)$$

由概率理论可以证明, σ 就是标准差。在正态分布的情况下, 式 (1-12) 中 σ 的物理意义是什么呢? 首先定性分析一下: 从式 (1-11) 可以看出, 当 $\varepsilon = 0$ 时,

$$f(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$$

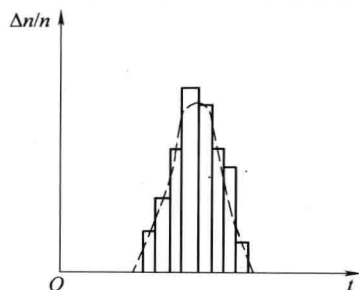


图 1-3 统计直方图

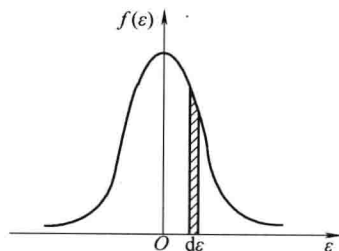


图 1-4 正态分布曲线

因此, σ 值越小, $f(0)$ 的值越大。由于曲线与横坐标轴包围的面积恒等于 1, 所以曲线峰值高, 两侧下降就较快。这说明测量值的离散性小, 测量的精密度高。相反, 如果 σ 值大, $f(0)$ 的值就小, 误差分布的范围就较大, 测量的精密度低。这两种情况的正态分布曲线如图 1-5 所示。

1.3.5 置信区间与置信概率

我们还可以从另一角度理解 σ 的物理意义。计算一下测量结果分布在 $-\sigma \sim \sigma$ 之间的概率, 可得

$$P_1 = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\varepsilon) d\varepsilon \approx 0.683 = 68.3\% \quad (1-13)$$

这就是说, 在所测的一组数据中平均有 68.3% 的数据测值误差落在区间 $[-\sigma, \sigma]$ 之间。同样也可以认为在所测的一组数据中, 任一个测值的误差落在区间 $[-\sigma, \sigma]$ 的概率为 68.3%。我们把 P_1 称作置信概率, $[-\sigma, \sigma]$ 就是 68.3% 的置信概率所对应的置信区间。

显然, 扩大置信区间, 置信概率就会提高。可以证明, 如果置信区间分别为 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 和 $[-3\sigma, 3\sigma]$, 则相应的置信概率为

$$P_2 = \int_{-2\sigma}^{2\sigma} f(\varepsilon) d\varepsilon \approx 0.955 = 95.5\% \quad (1-14)$$

$$P_3 = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\varepsilon) d\varepsilon \approx 0.997 = 99.7\% \quad (1-15)$$

一般情况下, 置信区间可用 $[-k\sigma, k\sigma]$ 表示, k 称为包含因子。对于一个测量结果, 只要给出置信区间和相应的置信概率, 就可以表达测量结果的精密度。

对应于 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 这个置信区间的置信概率为 99.7%, 即在 1000 次的重复测量中, 随机误差超出 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 的平均只有 3 次。对于一般有限次测量来说, 测值误差超出这一区间的可能性非常小, 因此, 常将 $\pm 3\sigma$ 称为极限误差。

1.3.6 粗大误差的发现和剔除

有时在一组测量数据中会出现一两个测值明显地偏离其他测值的情况。这种“离群值”的出现可能是由于测量本身随机性的客观反映, 这应该说是正常的, 但有时也可能是由于某种未被发现的异常干扰或操作失误造成的, 这种测值属于异常值, 应该剔除。在剔除异常值时难免会有错判的时候, 即把并非异常值当作异常值剔除了。应该使这种错判的可能性(概率)减小至某一程度。用 α 表示将正常值错判为异常值的概率, 一般取 $\alpha = 0.01$, 它表示错判的可能性小于或等于 1%。判别异常值的方法有多种, 本书仅介绍格拉布斯(Grubbs)准则, 判断的步骤如下:

在求出全组测值的各个残差和标准偏差 s 的基础上, 挑选出其中绝对值最大的残差, 设为 Δx_i , 再根据选定的 α 值和这组测值的个数 n (即重复测量的次数 n) 从表 2 中查出相应的格拉布斯系数 $G_\alpha(n)$ 的值, 若 $|\Delta x_i|$ 满足不等式

$$|\Delta x_i| > G_\alpha(n)s \quad (1-16)$$

则与这个 Δx_i 值对应的测值 x_i 为异常值, 应予剔除。

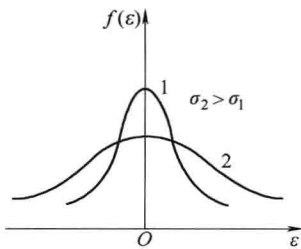


图 1-5 σ 的物理意义