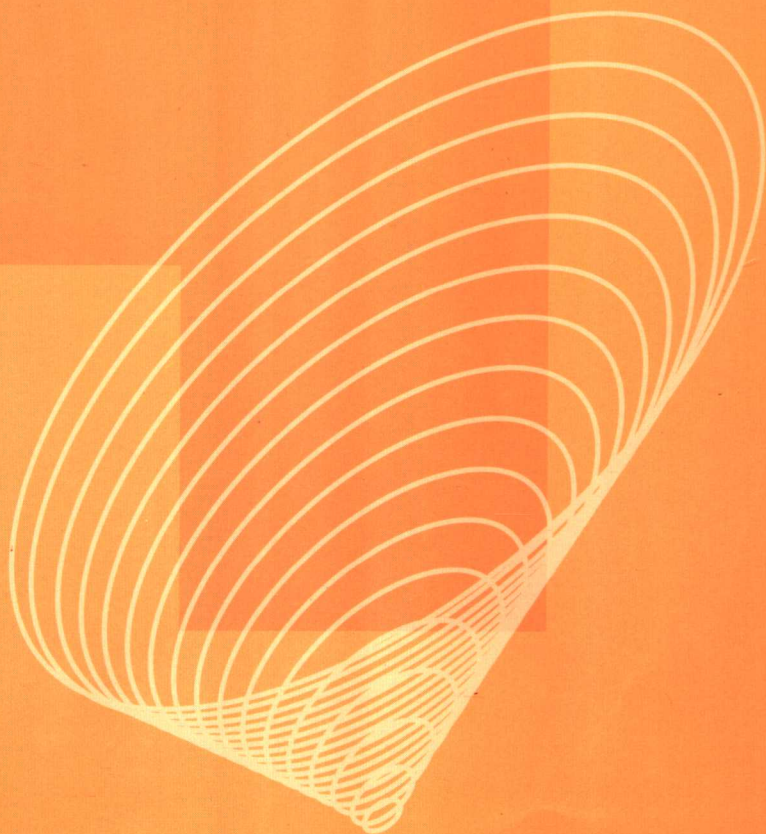


21 世纪高等院校教材

大学物理实验教程

牛爱芹 曹 钢 李淑华 主 编



科学出版社
www.sciencep.com

21 世纪高等院校教材

大学物理实验教程

牛爱芹 曹 钢 李淑华 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书依据教育部最新制定的《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求(正式报告稿)》,针对工科院校的特点与教学条件,在多年物理实验教学的基础上,吸收近年来教学改革和实验室建设的成果编写而成。内容既保留了原物理实验中的精华,又引进了近代物理内容和新的实验技术,如光纤传输、传感器、光谱、纳米微粒制备技术、核磁共振、原子力显微镜等。在实验项目的编排上打破了原来力、热、电、光的分类方式,按照实验理论和技能的难度分为基本实验、基础实验、综合应用实验、近代物理实验、设计性实验以及计算机仿真实验六个模块。实验分层次进行,注重拓宽学生知识面,发展学生个人兴趣。

本书适合作为高等院校工科物理实验课的教材或教师参考用书,也可供涉及物理学的广大科技工作者参考或供成人教育教学选用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/牛爱芹,曹钢,李淑华主编. —北京:科学出版社,2007
21世纪高等院校教材
ISBN 978-7-03-019529-6

I. 大… II. ①牛…②曹…③李… III. 物理学-实验-高等学校-教材
IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 118508 号

责任编辑:贾 杨 吴伶俐 / 责任校对:包志虹
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16
2007 年 8 月第一次印刷 印张:22 1/4
印数:1—7 000 字数:424 000

定价 29.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈文林〉)

前 言

本书根据教育部高等物理基础课程教学指导分委员会制定的《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求(正式报告稿)》,结合山东轻工业学院近几年来物理实验课程建设和教学改革以及实验室仪器设备的情况、在多年物理实验教学的基础上编写而成,集中反映了近年来我们在物理实验课程改革方面所取得的成果。

全书内容共八章,第一章讲述测量误差、不确定度和数据处理的基本知识,第二章介绍物理实验常用仪器和基本方法与实验技能.第三章至第七章共编 52 个实验.可以按不同需要和培养计划组织教学.根据教学改革的需要,本书主要有以下几个方面的特点:

(1) 在实验项目的编排上,打破原来力、热、电、光实验的编排方式,而按基本实验、基础实验、综合性、近代和设计性实验体系安排章节,以适应多层次物理实验内容体系的教学改革模式.这样可以使不同层次学生的实验能力得到充分的提高和锻炼,做到因材施教.

(2) 鉴于目前正推广使用不确定度表示实验结果的方法,本书在第一章中对此做了必要的阐述,并提供了选择性过渡方法,以便灵活掌握.如何处理这部分内容需要不断实践与探索,注意知识的科学性、系统性和先进性.

(3) 选题方面考虑到各专业的通用性、实用性、科学性和时代性,以供因材施教.内容安排遵循由浅入深、前详后略、先易后难和循序渐进的原则.

(4) 增加了计算机仿真实验,便于学生拓宽知识,同时,对学生利用现代化工具建立模拟仿真研究思想起到积极的作用,有利于提高他们探索物理规律的热情和积极性,培养他们的创新思维.

(5) 近年来,实验室建设经费投入较大,在保留传统基础实验的基础上,增加了近代物理实验以及与现代实验技术相关的当今物理学研究领域内最新进展的实验项目,如光纤传输、核磁共振、纳米微粒制备技术、扫描隧道显微镜、原子力显微镜等.将基础性和先进性有机地结合起来,符合当今教育发展的基本指导思想.

实验教材的基础是实验,它反映了实验室面貌和实验室建设的成果,而实验室建设的完善又是广大教师及技术人员长期共同努力工作的结果.在此,我们向 20 多年来共同工作的同事对本书的编写工作所做的贡献表示感谢!同时,本书还参阅了许多兄弟院校的教材,吸收了同类教材的精华,在此一并表示感谢!

本书由山东轻工业学院物理实验教学中心的部分任课教师编写,由牛爱芹等主编,具体分工如下:牛爱芹主持并编写绪论,第一章,实验 19~21、24、31~33、36、39、42~44、50~52,校阅了全部书稿;李淑华编写第二章部分内容,实验 3、4、15~18、34;曹钢编写实验 6、12、26、27、37、38、40、41、46~49;刘玉波编写实验 2、10、11、13、25、28~30、35、45,第八

章;卢军编写第二章部分内容,实验 1、5、8、9;钟世德编写实验 7、14、22、23. 在本书的编写和出版过程中得到了山东轻工业学院教务处及数理学院领导的大力支持;王朋教授主审全书,并提出了许多宝贵意见. 我们在此表示深深的谢意.

由于编者水平所限,书中难免有不妥或错误之处,恳请读者指正.

编 者

2007 年 3 月

目 录

前言

绪论	1
----	---

第一章 测量误差与数据处理的基本知识	4
--------------------	---

第一节 测量和测量误差	4
-------------	---

第二节 测量结果的误差估算	8
---------------	---

第三节 测量不确定度的评定	14
---------------	----

第四节 有效数字及数据处理的常用方法	18
--------------------	----

第五节 研究误差分析的意义	25
---------------	----

练习题	27
-----	----

第二章 物理实验常用的基本仪器和实验方法	29
----------------------	----

第一节 力学与热学测量仪器	29
---------------	----

第二节 电磁学测量仪器	37
-------------	----

第三节 光学测量仪器	45
------------	----

第四节 物理实验中常用的测量方法	47
------------------	----

第三章 基本实验	54
----------	----

实验 1 长度和物体密度的测量	54
-----------------	----

实验 2 重力加速度的测定	60
---------------	----

实验 3 伏安特性的测量	63
--------------	----

实验 4 电势差计的原理和应用	66
-----------------	----

实验 5 薄透镜焦距的测量	70
---------------	----

实验 6 示波器的使用	74
-------------	----

第四章 基础实验	87
----------	----

实验 7 气垫导轨实验	87
-------------	----

实验 8 金属弹性模量的测定	90
----------------	----

实验 9 刚体转动惯量的测定	97
----------------	----

实验 10 液体表面张力系数的测定	105
-------------------	-----

实验 11 用霍尔开关测量弹簧的劲度系数	109
----------------------	-----

实验 12 液体黏滞系数的测定	112
-----------------	-----

实验 13 用电流量热器法测定液体的比热容	117
-----------------------	-----

实验 14 空气比热容比的测定	120
-----------------	-----

实验 15 电表的扩程与校准	123
----------------	-----

实验 16 直流电桥测电阻	126
---------------	-----

实验 17 灵敏电流计的研究	133
----------------	-----

实验 18	用模拟法测绘静电场	139
实验 19	用分光计测棱镜折射率	142
实验 20	等厚干涉	147
实验 21	衍射光栅	151
实验 22	双棱镜干涉	154
实验 23	用旋光仪测糖溶液的旋光率和浓度	158
第五章	综合应用性实验	162
实验 24	不良导体导热系数的测定	162
实验 25	弦振动的研究	167
实验 26	用动态法测定金属的杨氏模量	171
实验 27	用霍尔元件测磁场	174
实验 28	铁磁材料的磁滞回线测定	182
实验 29	交流电桥	188
实验 30	金属电子逸出功的测定	197
实验 31	声速的测量	202
实验 32	迈克耳孙干涉仪的使用	209
实验 33	全息照相	215
实验 34	微波布拉格衍射	220
实验 35	多功能光栅光谱测量与光谱分析	224
实验 36	光纤传输技术实验	228
第六章	近代物理实验	239
实验 37	弗兰克-赫兹实验	239
实验 38	用光电效应法测普朗克常量	244
实验 39	光拍频法测量光速	252
实验 40	CCD 微机密立根油滴实验	258
实验 41	荧光分光光度计实验	264
实验 42	纳米微粒制备技术实验	275
实验 43	核磁共振	282
实验 44	扫描隧道显微镜的应用和样品分析	289
实验 45	原子力显微镜应用和样品检测	300
第七章	设计性实验	311
实验 46	简谐振动的研究	311
实验 47	非线性电阻特性的研究	312
实验 48	滑线变阻器特性的研究	314
实验 49	用电势差计校准电表	315
实验 50	用折射极限法测液体的折射率	316
实验 51	光栅特性研究	317
实验 52	自组显微镜和望远镜	318

第八章 计算机仿真模拟实验	321
第一节 计算机仿真模拟实验简介.....	321
第二节 仿真实验的操作方法与实验报告处理系统.....	322
第三节 大学物理仿真实验运行举例.....	329
附录	339
附录一 国际单位制.....	339
附录二 常用的物理数据.....	341

绪 论

一、物理实验课程的地位、作用和任务

物理学是一门建立在实验基础上的科学,物理概念的形成、物理规律的发现、物理理论的建立,都必须以严格的科学实验为基础,并被以后的科学实验所验证.实验是检验科学理论的唯一手段,实验与科学理论相结合,便产生了种种不同类型的科学技术.因此,理论分析和实验技术有着同等重要的地位.在学习中既要注意它们的内在联系和配合,又分清其各自的任务和作用.

物理实验课就是用实验的方法研究物理现象的本质和规律.物理实验课是理工科大学进行科学实验基本训练的一门必修课程,是本科生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端.物理实验课的教学应把培养学生的科学实验能力、严谨的科学素养和创新能力放在首位.

大学教育,不仅要求学生掌握已知科学知识,更要培养学生探索未知自然规律的能力.近年来,随着物理实验教学体系和内容的改革,物理实验课在高素质应用人才培养中越来越显示其独特的地位和重要性.因此,学好物理实验对于高等学校理工科学生是十分重要的.

本课程的具体任务:

(1) 培养学生的实验技能,提高学生的科学实验基本素质,并通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验知识,加深对物理学原理的理解.使学生初步掌握实验科学的思想和方法.

(2) 培养与提高学生的科学实验能力,要求学生做到:

- 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,正确使用常用仪器;
- ③ 正确测量、记录与处理实验数据,写出合格的实验报告;
- ④ 运用物理学理论知识对实验现象和结果进行分析和判断;
- ⑤ 能够完成简单的设计性实验.

(3) 培养学生理论联系实际的科学作风、认真严谨的工作态度、实事求是的科学态度、主动研究的探索精神、遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品德.

二、物理实验课程的主要教学环节

一般实验教学可分为实验预习、实验操作和撰写实验报告三个环节.

1. 实验预习

实验预习是为实验操作做准备的,通过实验预习应明确三个问题:做什么?怎么做?

为什么?为此需要做到:认真阅读实验指导书,事先对实验内容做全面的了解,了解实验目的与要求,理解实验原理,弄清实验中使用基本仪器的构造原理、操作规程、读数原理和方法及注意事项.明确实验步骤,抓住实验关键,写好预习报告.预习报告包括:实验名称、实验目的、实验仪器和实验原理.原理要求文字简明,概念清楚,如列出实验所依据的原理公式、单位及实验条件.设计并画好记录数据用的表格.

2. 实验操作

实验操作是整个实验教学中最重要的一个环节,动手能力、分析问题和解决问题等能力的培养,主要在具体实验操作时完成.在该环节中,学生在教师指导下独立地进行仪器的正确安装和调整.

学生进入实验室内要遵守实验规则,服从教师的指导.

实验时,首先了解使用仪器的主要性能、操作方法和注意事项.根据操作规程正确调试好仪器,仔细观察实验现象,完整记录实验原始数据.记录内容包括:仪器的名称(型号与规格)、实验条件、实验现象和实验数据.

操作完成后,记录的原始数据经教师审阅签字有效,再把仪器复原、整理好,方可离开实验室.

3. 撰写实验报告

实验报告是学生实验成果的书面反映.实验报告一律用统一的实验报告纸书写,并且要求文句简练,字体端正,版面整洁,内容完备.一份完整的实验报告应包括以下内容:实验名称、实验目的、实验仪器、实验原理、实验内容及步骤、数据表格和数据处理、问题讨论、对实验的改进意见,并把原始数据附在实验报告的正文之后.

以上所述的三个基本环节构成了大学物理实验的全过程.预习是做好实验的基础;实验操作是学习实验技能、完成实验任务的主要环节;撰写实验报告是对实验的总结,把感性认识深化为理性认识,同时也培养书写科研报告的能力.认真做好这三个环节,是学好物理实验课的保证.

物理实验虽然是在教师指导下由学生独立进行的,但在实验中,学生不应是完全按照“操作指令”运转的“机器人”,而应该积极发挥自己的主观能动性去思考问题,进行观察分析,探讨最佳的实验方案,不断改进实验方法,增强自己的才干和实验技巧.

请记住:我们不是要一个塞满东西的脑袋,而是要一个善于分析问题的头脑,我们不仅要有知识,更重要的是将知识转化为能力.

4. 物理实验室规则

(1) 参加物理实验的学生,实验前必须完成指定的预习内容,明确要完成的实验目的、原理、步骤、要求、注意事项等,并写出预习报告,经教师检查同意后方可进行实验.

(2) 物理实验实行每人一套仪器的学习方式,学生必须学会和养成独立思考、独自操作的习惯,努力提高自己的动手能力.

(3) 上课时不准迟到,不准无故缺课.无正当理由迟到 15 分钟者实验要扣分;超过半

小时者,教师有权取消其本次实验资格.

(4) 遵守课堂纪律,学生必须在规定的时间内完成实验任务,保持安静的实验环境和卫生.

(5) 使用电源时,务必经过教师检查线路后才能接通电源.实验中,要注意人身安全和设备安全.

(6) 实验时要节约水、电、材料等.

(7) 爱护仪器设备.进入实验室不能擅自搬弄仪器,实验中必须严格按照实验要求和仪器操作规程,积极认真地进行实验.仪器如有损坏照章赔偿.共用工具用完后应立即归还原处.

(8) 做完实验,学生应将仪器整理还原,将桌面和凳子收拾整齐.经教师审查测量数据和仪器还原情况并签字后方能离开实验室.

实验报告应在实验后一周内交实验室.

第一章 测量误差与数据处理的基本知识

误差理论及数据处理是一切实验结果中不可缺少的基本内容,是不可分割的两个部分,物理实验的任务不仅是定性地观察各种自然现象,更重要的是定量地测量相关的物理量,而对事物的定量描述又离不开数据处理方法和实验数据处理及结果的表示.因此,误差分析和数据处理是物理实验的基础.本章所介绍的都是初步知识,这些知识不仅在每一个物理实验中都要用到,而且是今后从事科学实验必须了解和掌握的.这部分内容牵涉的方面较广,不可能在一两次学习中掌握.我们要求同学首先认真阅读教材,对需掌握的问题有一个初步了解,然后结合每一个具体实验再细读有关的段落,通过实际运用加深理解.应该说明的是,对这些内容的深入讨论是普通计量学以及数理统计学的任务,本书只能引用其中的某些结论和计算公式,更详细的探讨和证明留待数理统计课程中解决.

第一节 测量和测量误差

一、测量与误差

进行物理实验,总是使用一定的实验方法,由实验者选用一定的仪器,在一定的条件下对某些物理量进行测量,最后用正确的形式把实验结果表示出来.由于实验方法的完善性、实验仪器的精度、实验环境的条件以及实验者的习惯等因素,不可能使实验结果非常完美,即一定存在误差.如何正确地处理实验数据,使测量结果尽可能地接近真值,减少误差,这是实验过程中必须要掌握的.

(一) 测量

1. 测量的定义

物理实验离不开对物理量进行测量,不论是研究物理现象、验证物理原理,还是研究物质特性等都要进行测量.所谓测量,就是将被测量与一个选作标准单位的同类量进行比较,其倍数即该被测量的测量值.例如,我们用游标卡尺来测量某圆柱体的直径 d 、高度 h ;测量某导体的电阻 R 、长度 L 和截面积 S ;用电流表测量电路中的电流 I 等.

2. 测量的分类

按照测量方法的不同,可将其分为直接测量和间接测量.

1) 直接测量

能够用仪器或量具直接得到被测量值大小的测量方法称为直接测量,相应测得的物理量称为直接测量量.例如,用米尺测量物体的长度 L 、用等臂天平测量物体的质量 M 等,就是直接测量.

2) 间接测量

有些物理量是不能用所给的仪器直接测量的,而是要以直接测量为基础,并通过直接测量利用一定的函数关系求出被测量的大小,这种测量方法称为间接测量法.例如,用游标卡尺来测量圆柱体的体积 V ,首先要通过对其直径 d 、高度 h 的测量,然后用函数关系 $V = \frac{\pi}{4} d^2 h$ 来求得 V ,所以这种测量是间接测量.

在大学物理实验中遇到的测量大多是间接测量,而间接测量又是以直接测量为基础的,只有通过最终被测量有函数关系的其他量的直接测量才能得到最终测量的量值.

(二) 误差

1. 真值与误差的定义

测量的目的是什么?就是想得到被测量的真值,由于测量仪器、测量方法、实验条件以及种种因素的局限,测量是不可能无限精确的,通过有限的实验手段所得的测量结果与真值之间总是有一定的差异.也就是说,总是存在测量误差.那么,什么是真值与测量误差呢?

1) 真值

一个待测物理量的大小,在客观上应该有一个真实存在的数值叫“真值”.也就是说,当某一个量能被完善地确定并能排除所有测量上的缺陷时,通过测量所有得到的数值就是真值.当对某量的测量不完善时,通常就不能获得真值.从测量的角度来讲,测量总是不可能绝对完美的,因此绝对真值是不可能知道的,也是无法测得的.

一个量的真值,是它本身客观上所具有的真实大小,它是一个理想的概念.

2) 测量误差

所谓测量误差,是指测量值与真值之差称为误差,即

$$\Delta x = x - x_{\text{真}} \quad (1-1-1)$$

由式(1-1-1)可知,误差是有正负的,当 $x > x_{\text{真}}$ 时, Δx 为正;当 $x < x_{\text{真}}$ 时, Δx 为负, Δx 反映了测量值偏离真值的大小和方向,故称为绝对误差.绝对误差可以表示某一测量结果的好坏,但在比较不同测量结果时则不太方便.

3) 相对误差

测量的绝对误差与被测量真值之比称为相对误差,相对误差常用百分数来表示,即

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

绝对误差反映了误差本身的大小,而相对误差反映了误差的严重程度.必须注意,绝对误差大的,相对误差不一定大.例如,测量 20.0V 的电压,绝对误差为 0.02V,则相对误差为 0.1%;而测量 1.00V 电压时,绝对误差仍为 0.02V,则相对误差为 2%.两者的绝对误差相同,但是测量值相差 20 倍,因而相对误差也就差了 20 倍.可见,绝对误差的大小与相对误差的大小之间没有必然的联系.

由上述可知,“真值”是无法知道的,那又如何求出绝对误差和相对误差呢?

在物理实验中,一般可以用一些非常接近真值的近似值或理论值来代替真值.例如:

- (1) 公认值. 由国际计量大会约定的值, 如基本物理常数、基本单位标准等.
- (2) 高级仪器的测量值. 由更高级的仪器测量出来的值.
- (3) 多次测量的平均值. 在比较理想的条件下, 可以用多次测量所得的平均值来代替真值. 这是我们常用的办法.

2. 误差的分类

误差产生的原因很多, 按照误差产生的原因和不同性质, 可将测量误差分为系统误差和偶然误差.

1) 系统误差

在同一测量条件下多次测量同一物理量时, 其误差的绝对值和符号保持恒定或在条件改变时, 误差的大小和方向按一定规律变化, 这类误差称为系统误差. 系统误差的特征是有其明显的确定性. 系统误差及其产生的原因可能已知, 也可能未知, 系统误差包括已定系统误差和未定系统误差. 已定系统误差是指符号和绝对值已经确定的系统误差; 未定系统误差是指符号或绝对值未经确定的系统误差.

系统误差的来源主要有:

- (1) 仪器误差. 仪器的固有缺陷(例如, 电表的示值不准、零点未调好、等臂天平的两臂不相等).
- (2) 环境误差. 由于环境条件变化(如温度、压强偏离标准条件)所引起的误差.
- (3) 方法误差. 实验方法的不完善或这种方法依据的理论本身具有近似性(如伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响、称质量时未考虑空气浮力的影响).
- (4) 观测误差. 由于观测者的生理或心理特点造成的误差(如有的人习惯于侧坐或斜坐读数, 使读得的数值总是偏大或总是偏小).

由于系统误差在测量条件不变时有确定的大小和正负号, 因此在同一测量条件下多次测量求平均并不能减少它或修正它.

对于系统误差, 必须找出其产生原因, 针对原因去消除或引入修正值对测量结果进行修正. 系统误差的处理是一个比较复杂的问题, 没有一个简单的公式可以遵循, 需要根据具体情况做出具体的处理. 首先要对误差进行判别, 然后将误差尽可能地减少到可以忽略的程度, 这需要实验者具有相应的经验、学识与技巧, 一般可以从以下几个方面进行处理:

- (1) 检验、判别系统误差的存在.
- (2) 分析造成误差的原因, 并在测量前尽可能消除.
- (3) 测量过程中采取一定的方法或技术措施, 尽量消除或减少系统误差的影响.
- (4) 估计残有系统误差的数值范围, 对于已定系统误差, 可用修正值(包括修正公式和修正曲线)进行修正; 对于未定系统误差, 尽可能估计出其误差限值, 以掌握它对测量结果的影响.

我们将在今后的某些实验中, 针对具体情况对系统误差进行分析和讨论.

2) 偶然误差

在同一条件下多次测量同一物理量时, 误差的绝对值和符号以不可预定的方式变化, 这类误差称为偶然误差. 这种误差是实验中各种因素的微小变动引起的. 偶然误差的特征

是其随机性. 根据误差的特征可以知道, 偶然误差不可修正. 偶然误差就个体而言是不确定的, 但其总体(大量个体的总和)服从一定的统计规律, 因此可用统计方法估计其对测量结果的影响.

偶然误差的主要来源有测量仪器、环境条件和测量人员, 这些因素对测量会产生微小的影响, 而这些影响往往是随机变化的.

大量的偶然误差服从正态分布(或高斯分布), 它的特点是: ①单峰性. 绝对值小的误差比绝对值较大的误差出现的概率要大. ②对称性. 绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相同. ③有界性. 绝对值非常大的正、负误差出现的概率都趋近于零, 即实际上不出现. ④抵偿性. 随着测量次数的增加, 偶然误差的算术平均值趋向于零. 一般说来, 适当增加测量次数求平均可以减小误差.

偶然误差正态分布的这些特点在图 1-1-1 上可以看得非常清楚. 该曲线横坐标为测量误差 x , 纵坐标 $f(x)$ 是误差的概率密度分布函数. 它的意义是, 单位误差范围内出现的误差概率. 曲线下阴影线包含的面积元 $f(x)dx$, 就是误差出现在 x 至 $x+dx$ 之间的概率(可能性).

根据统计理论可以证明函数

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1-1-3)$$

式中, σ 是一个取决于具体测量条件的常数, 称为标准误差. 由误差分布曲线可见, 曲线中部是凸曲线, 曲线两侧是凹曲线, 因此曲线上必须有转折点. 容易证明, 该转折点的横坐标值 $x = \pm\sigma$.

当 $x=0$ 时, 由式(1-1-3)得

$$f(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (1-1-4)$$

由式(1-1-4)可见, 某次测量中若标准误差 σ 很小, 则必有 $f(0)$ 很大, 分布曲线中部将上升较高, 两旁下降得就越快, 表示测量离散性小, 精密度高; 相反, 如果 σ 很大, 则 $f(0)$ 就很小, 误差分布的范围就较宽, 说明测量的离散性大, 精密度低, 如图 1-1-2 所示.

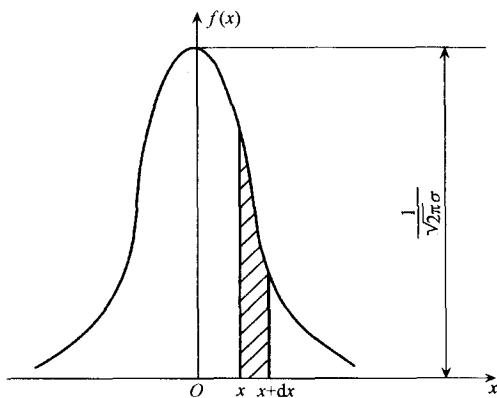


图 1-1-1 偶然误差的正态分布曲线

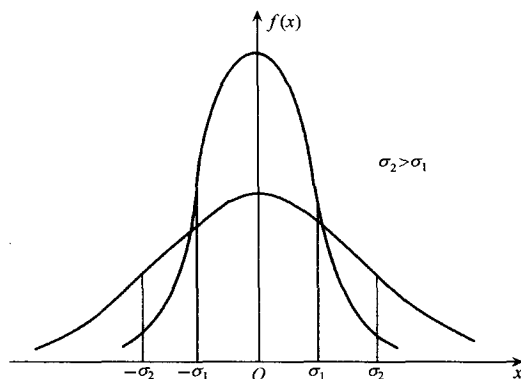


图 1-1-2 σ 对 $f(x)$ 的影响

第二节 测量结果的误差估算

本节主要讨论测量量偶然误差的估算,并且是在错误数据已经剔除、系统误差已经消除或系统误差相对于偶然误差小很多的情况下进行的.估算偶然误差常用的方法有算术平均误差和标准差两种.我国采用标准差表示测量的准确度.虽然在普通物理实验中对测量结果的准确度要求不高,但考虑到现代生产实践和科学实验要求能正确地评价测量结果的准确度,因此完全有必要要求和训练在实验中按照较严格的误差理论来处理实验数据,即用标准差、置信概率和置信限等来评价测量结果的准确度和可靠性.

标准差又称为均方根误差,它建立在偶然误差统计理论基础上,用以较为合理地估算测量数据列的离散程度和测量结果的可靠性.

采用标准差表示测量准确度,最大的优点是,在理论上,若只计算合成的标准差,则不论各随机误差的概率分布是否相同,只要误差彼此独立,它们共同影响该量总的标准差为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \cdots + \sigma_n^2} \quad (1-2-1)$$

所以国内外普遍采用 σ 值来估算测量误差.

一、算术平均值、算术平均偏差、标准偏差

关于偶然误差的分布规律和处理方法,涉及较多的概率和数理统计知识,这里只引用结论,不进行论证.

1. 算术平均值

由于测量误差的存在,真值实际上是无法测得的.如果在一切明显的系统误差已被消除到足以忽略的实验中,对被测物理量进行多次相同的测量,得到的将是一组大小略有起伏的测量数据.根据偶然误差分布规律,测量值偏大或偏小同样数量的机会(即绝对值相等的正负误差出现的概率)是相同的.

设在相同条件下对某一物理量进行 n 次独立的直接测量,所得 n 个测量值为 $x_1, x_2, x_3, \cdots$ 这 n 个测量值的集合称为测量列.测量列的算术平均值为

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

由式(1-2-2)可知,若无系统误差时,测量值的平均值可作为被测量的真值.由偶然误差特点可证:当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\bar{x}$ 与真值 x 趋于重合;当 n 为有限次数时, $\bar{x}$ 则为真值的最佳估计值.

2. 算术平均偏差

在多次测量时,各次测量值不同,误差也就不同,如何表示其测量的误差呢?这里有两个问题:一是如何说明这一列多次测量值的分散性(或精密度);二是如何估计所得平均值的误差范围(或准确度).为了估计误差,定义测量值与最佳值之差为偏差,偏差又叫残差.把它们的平均值定义为算术平均偏差,即

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

上式中考虑了全体偏差的贡献。在物理实验中,由于真值是得不到的,因此误差无法知道,只能用偏差代替误差计算。测量偏差可以准确地知道,实验误差分析中使用算术平均偏差 $\overline{\Delta x}$ 来估算测量值的误差。

显然,由式(1-2-3)看出, $\overline{\Delta x}$ 的值越大,表明这一系列测量值分散性越大; $\overline{\Delta x}$ 越小,则表明测量值的精密度越高。

3. 标准偏差

实验标准偏差是指:对同一被测量的 n 次测量中,反映各次测量结果的分散程度的量,即在测量列中一次测量的标准偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-2-4)$$

式(1-2-4)又称为贝塞公式。实验标准偏差不是测量的实际误差,它只是一组测量数据可靠性的估计。它表示,根据这列 n 次测量值可知,在同一条件下任做一次测量,所得测量值有68.3%的概率(见图1-1-1)会落在 $\bar{x} \pm \sigma$ 的范围内。

同样,标准偏差 σ 的值越大,表明测量列的分散性越大; σ 值越小,则表明测量的精密度越高。

在科学实验和工业计量中常用标准偏差来表示测量的精密度,但在实际物理教学实验中,测量次数较小,迄今仍常用算术平均偏差来表示。

4. 算术平均值的标准偏差

对测量平均值 $\bar{x}$ 的误差进行估计,本应涉及系统误差。对于系统误差(已知),可设法减小或对测量值进行修订。但总会有一些微小的系统误差因素难以消除或查明;有限次测量本身也会使 $\bar{x}$ 偏离真值。这些因素综合起来,使平均值 $\bar{x}$ 也成为一随机量,因而可用统计方法来估计 $\bar{x}$ 的误差。可以证明,平均值的标准偏差 $\sigma_{\bar{x}}$ 是单次测量的标准偏差 σ 的

$\frac{1}{\sqrt{n}}$,即

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

它表示在 $(\bar{x} - \sigma_{\bar{x}}, \bar{x} + \sigma_{\bar{x}})$ 范围内包括真值 $x_{\text{真}}$ 的概率为68.3%。

由式(1-2-5)可知,随着测量次数的增加, $\sigma_{\bar{x}}$ 减小。这就是通常所说的增加测量次数可以减小偶然误差。

5. 测量结果的表示

设测量列的算术平均值及其总的标准偏差分别为 $\bar{x}$ 和 $\sigma_{\bar{x}}$,则测量结果可表示为