

Experiments in University

大学物理实验

上册 (理工基础部分)

主 编 王廷兴 郭山河 文立军
副主编 田云霞 陈玉琴



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

33
7-1

大学物理实验

上 册

(理工基础部分)

主 编 王廷兴 郭山河 文立军
副主编 田云霞 陈玉琴



高等教育出版社

内容简介

本书是在吉林大学公共物理教学中心多年教学经验的基础上,根据“高等院校工科本科大学物理实验教学基本要求”编写而成的.全书分上、下两册.上册共分三章,第一章测量误差及数据处理,介绍了误差的理论、概念、数据处理及用不确定度估算误差的方法,这是物理实验课中的理论课;第二章基本物理实验仪器及测量,就是力学、电学、光学三种基本仪器及测量的基础实验;第三章物理基础实验,本章共有 27 个基本实验,每个学生可以根据自己的兴趣和需要选做不同题目的实验.

本教材可作为高等院校理工科非物理类专业的物理实验课程教材或参考书,也可供有关技术人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验.上册,理工基础部分/王廷兴,郭山河,文立军主编.—北京:高等教育出版社,2003.12

ISBN 7-04-012988-4

I. 大... II. ①王...②郭...③文... 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(2003)第 091963 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 15.75
字 数 290 000

版 次 2003 年 12 月第 1 版
印 次 2003 年 12 月第 1 次印刷
定 价 18.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换.

版权所有 侵权必究

前 言

本大学物理实验教材内容比较广泛,其中上册基本物理实验有 31 个题目,可以满足理工科非物理专业学生的要求及需要.下册综合、设计及应用性实验有 21 个题目,近代物理实验 13 个题目,总共有 34 个实验题目供非物理专业学生对物理科学进一步学习、提高、深造,选修物理实验课使用.

在实验题目的选择上,无论是必修基础部分,还是选修提高部分,基本涵盖了各高校已经开出的绝大部分实验题目,为了提高教学质量,在实验内容上有增有减.在实验题目上我们增加了与科学技术发展紧密相联的一些题目.例如光纤技术、传感器技术、高温超导、相对论效应及扫描隧道显微镜、声光、光电效应等实验,使那些对物理科学感兴趣的非物理类专业的学生有一个较好的学习条件.

近代物理实验中的实验 5.13《超精细结构光谱的观察与波长差的测量》,该实验是一个认识、研究光谱与原子核结构关系的实验.在该实验中,我们不仅能清楚看到了与核自旋相关的超精细结构光谱,测量超精细光谱之间的波长差.而且发现了一实验现象,那就是钠黄光的超精细结构光谱的波长差与钠光灯温度有关.实验表明灯温越高,分裂宽度——波长差越大,这一现象目前还没有理论解释.

第一章测量误差及数据处理,这部分我们编写了 11 小节,是按 6 学时内容编写的.但目前大多数学校都把这部分内容用 4 学时讲授,如果用 4 学时讲授,可只讲前 7 小节内容,后 4 小节内容可让学生自己阅读.编写这一章内容,我们的想法是把测量误差的概念论述得详细、清楚、准确.数据处理上重点是会计算直接测量量和间接测量量的测量结果,会对直接测量结果和间接测量结果误差用不确定度进行估算.正确认识理解误差与标准偏差、A 类标准不确定度、B 类标准不确定度以及合成不确定度之间的差别与联系,目前对于用不确定度估算、表示误差的这种规定在学术界尚有争论,不确定度概念本身也不十分成熟,因此对于置信区间与置信概率的概念只做简单的介绍,更深刻的内容、理论根据我们没有进行论述.

我们把这本《大学物理实验》教材分为上、下两册的原因是大学物理实验课是非物理类专业学生的理、工、医等科的一门独立必修课,但是该门课程的总学时仅有 50 多学时,这就决定了一个学生所做实验的题目不会超过 20 个.所以,我们编了《大学物理实验》上册,供 50 多学时的必修课使用.由于这些学生的学科面较宽,学生的兴趣、爱好也会有很大差别,为了调动学生的学习兴趣、积极

性,我们在上册教材中,除编写了力、电、光 4 个物理实验仪器及测量必做实验外,在第三章基本物理实验中我们编写了 27 个题目的实验供同学们自己选择.为了使非物理专业的学生有对物理学深造的机会,我们开设了《近代物理与实验》和《物理实验》的选修课,配合这两门选修课我们编写了《大学物理实验》下册,供有兴趣进一步深造的学生使用.

下册是从第四章综合、设计及应用性实验开始,这一章有 21 个题目的实验,主要选择了综合性及应用性的实验,而且在每个实验里我们安排了部分设计性的内容,这样有助于学生的能力(动脑、动手)的培养.第五章是 13 个题目的近代物理实验,这部分实验除了培养学生的能力外,还在于巩固和加深对物理理论知识的掌握.在第四章中有部分应用物理技术实验题目,这些实验与当代科学技术发展和实际应用紧密联系着,例如:相对论效应、高温超导、散斑照相测位移、扫描隧道显微镜、黑白图像的假彩色化、电光效应、真空镀膜等实验,使物理实验与现代科学技术接轨,激发学生的学习兴趣、热情,为培养合格的 21 世纪人才创造了一个良好的基础条件.

本教材是在王秉超老师的指导下,吉林大学的部分骨干教师编写的,在全体参编人员共同研究了原则、方案,制定了编写大纲的基础上,再具体分工,个人执笔完成所承担的部分,由主编统稿而成.为学习、交流、探讨方便,编写人都署名在各自编写部分之后.

尽管广大实验教师和实验技术人员没有直接参加本教材的编写,但是参编人员吸取了全体老师和技术人员的丰富经验和成果.所以,本教材的出版是物理教学中心全体实验教师和实验技术人员多年辛勤劳动的成果.

本书的编写得到了校教材科、物理科学院及物理教学中心的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢.

由于我们的水平有限,又是第一次编写使用面这么广的大学物理实验教材,书中一定会有不妥甚至是错误之处,诚恳希望读者提出、指正.

王廷兴

2003 年 3 月

目 录

绪论	1
第一章 测量误差及数据处理	4
§ 1.1 测量与误差的概念	4
§ 1.2 测量的精密度、准确度和精确度	8
§ 1.3 正态分布	9
§ 1.4 直接测量结果与误差的估算	12
§ 1.5 间接测量结果的误差估算	18
§ 1.6 有效数字及其运算规则	24
§ 1.7 用作图法处理数据	30
§ 1.8 用逐差法处理数据	31
§ 1.9 用最小二乘法处理数据	33
§ 1.10 物理实验的基本测量方法	36
* § 1.11 关于不确定度问题	39
习题与思考题	42
第二章 基本物理实验仪器及测量	45
实验 2.1 力学基本仪器及测量	45
实验 2.2 电学基本仪器及测量	54
实验 2.3 光学基本仪器及测量	57
实验 2.4 电子基本仪器及测量	66
附录 A 常用物理常量	74
附录 B 电学基本仪器简介和电学实验操作规程	77
附录 C 光学实验基本知识	83
第三章 物理基础实验	87
实验 3.1 重力加速度的测量	87
实验 3.2 转动惯量的测量	92

实验 3.3	杨氏模量的测量	98
实验 3.4	物体运动的测量与研究	107
实验 3.5	液体粘度的测定	113
实验 3.6	测量液体比热容及表面张力	118
实验 3.7	声速的测量	133
实验 3.8	电表改装与万用表	137
实验 3.9	单臂电桥测电阻	142
实验 3.10	双臂电桥测低电阻	146
实验 3.11	电势差计的原理及使用	151
实验 3.12	用模拟法测绘静电场	157
实验 3.13	霍尔效应法测磁场	162
实验 3.14	用冲击法测绘铁磁材料的磁化曲线	167
实验 3.15	灵敏电流计的实验研究	173
实验 3.16	RLC 串联电路的稳态特性的研究	178
实验 3.17	用光栅、三棱镜测光波波长	184
实验 3.18	双棱镜测波长与单缝衍射光强分布的测定	190
实验 3.19	定域干涉测波长	196
实验 3.20	光的偏振	200
实验 3.21	照相技术	206
实验 3.22	电子束的磁聚焦与比荷的测定	214
实验 3.23	光电效应测普朗克常量	219
实验 3.24	密立根油滴法测定电子电荷量	223
实验 3.25	迈克耳孙干涉仪	229
实验 3.26	单色仪的定标与应用	236
实验 3.27	超声光栅测液体声速	240

绪 论

一、物理实验课的地位和作用

物理学是一门实验科学,实验对物理学的重要性自不必言,物理实验是人为地创造出一种条件,按照预定计划,以确定顺序重现一系列物理过程或物理现象,其目的在于培养学生的实验能力.由于物理学所具有的基础性和普遍性,使物理实验课同样具有基础性和普遍性.作为大学的一门基础课,是学生进入大学后受到系统的实验技能训练的开端,是后续课程的实验基础,是提高实验能力的重要起点.这就是各专业必修物理实验课的根本依据.

实验能力包括:实验的构思、设计、组织、进行;仪器的制作、选择、安装、调试;数据的测量、读取、记录、处理;结果的分析、表达、推理、论断;报告的撰写和发表,等等.物理实验课是选取一些实验基本理论、基本物理量、基本方法和基本操作技能为主要教学内容进行教学的.在每一个实验的过程中,几乎所有实验能力都涉及到,然而指望通过一两个实验来培养实验技能显然是办不到的.在教学过程中,每个实验只侧重培养实验技能的几个方面,只有通过全面的学习,才能获得完整的实验基本技能.

物理实验课培养学生通过实验手段去发现问题、分析问题和解决问题的能力.因此,要求学生在每个实验中必须做到既动手、又动脑,将理论知识与实验技能很好地结合起来.

二、物理实验课的基本程序

物理实验包括内容很多,对同一内容,测量方法也不尽相同.但是实验程序大都相同,一般地可分为三个阶段,即实验前的预习,进行实验,撰写实验报告.

1. 实验前的预习

课堂上实验时间有限,每次实验从理解内容、熟悉仪器,到准确测量,任务是很重的,需要一定的时间.为了有效地利用课上时间,高质量地完成实验课的任务,要求课前对所要进行的实验内容进行预习.

预习的主要要求是:认真阅读实验教材中所做实验的章节及相关的资料,了

解本次实验的目的、内容、依据的基本原理,使用仪器以及实验方法步骤、要测哪些量,等等。

预习时要写书面预习报告,内容包括:

- (1) 实验名称。
- (2) 实验目的。
- (3) 实验依据的简要原理。
- (4) 实验的主要步骤。
- (5) 记录数据需用的表格,表中要标明已知物理量和待测物理量的文字符号及单位,测量次数,等等。
- (6) 预习中遇到的问题和实验中的注意事项。

总之,在课前对所要进行的实验,要做到心中有数,以便在课上能够抓住实验的关键,及时、准确、迅速地获得待测量的数据。

2. 进行实验

- (1) 实验前要对照教材熟悉仪器,了解仪器的工作原理及用法。
- (2) 经教师允许后,开始安装、调整仪器。
- (3) 每次测量后,应立即将数据记录在预习报告中的数据表格内或实验记录本上,要根据仪表的最小刻度和级别,决定实验数据的有效数字位数。各个数据之间,数据与图表之间不要太挤,要留有空地,以供必要时补充或更正。但所测的数据不能随便涂改,更不允许按实验室的“标准数据”修改自己的数据,要培养实事求是的学风,数据确实有错,可将其划掉,说明理由将正确的写在旁边,发现操作有错或误差过大,应耐心重测。

数据记录应包括以下几个部分:

- ① 实验条件:如温度、湿度、气压等。
- ② 仪器的规格和初始条件:如初读数、主要仪器的型号、精度、组别等。
- ③ 实验数据(不经运算的原始数据)。

实验结束时,要经教师检查实验数据和仪器,然后整理仪器和实验台,离开实验室。

3. 撰写实验报告

实验报告是实验工作的全面总结,要用简明的形式将实验结果完整而又真实地表达出来。实验报告不但是给自己看的,一般也为他人所看,故要用简练的文字撰写,要求文字通顺,字迹端正,图表规矩,结果正确。

实验报告一般应写出如下各项:

- (1) 实验的年、月、日、天气、温度、气压、姓名、班、组等。
- (2) 实验题目。
- (3) 实验目的。要写明在实验中解决什么问题。

(4) 实验原理. 写明实验的基础理论, 不是简单地抄写教科书, 而是经过自己认真研究、归纳、整理, 简明易懂地精练写出.

(5) 仪器设备. 写明实验中所用的仪器、材料和工具.

(6) 实验的主要步骤.

(7) 实验数据. 将课上测得的数据整理好, 填在表格里.

(8) 数据处理. 写清所用公式, 处理数据的计算过程, 即使只需将最后结果填在表格里, 也要给予说明.

(9) 误差分析.

(10) 正确地表示实验结果.

(11) 讨论(思考题).

前八项很简单, 参考教材即可完成, 现将后三项简要说明一下:

误差分析包括两方面的内容, 一是估算测量结果的误差范围, 因为判定实验结果的不准确范围——不确定度和获得实验结果具有同等的重要性. 二是找出影响实验结果的主要因素, 从而采取相应的措施以减少误差. 对已知标准值, 把测量结果与标准值比较, 误差过大或测量结果不在误差范围内, 应分析原因, 对误差做出合理的解释.

在表达实验结果时, 一般包括不可分割的三个部分, 即结果的测量值 $\bar{N}$, 结果的误差范围(用绝对误差 ΔN 表示)置信区间和结果的准确程度(可靠程度), 综合起来可写为

$$N = (\bar{N} \pm \Delta N) \quad (\text{单位})$$

如果实验系观察某一物理现象或验证某一物理定律, 则只需扼要地写出结论.

在最后的讨论中, 包括回答实验的思考题, 分析实验中观察到的异常现象及可能的解释, 对于实验仪器装置和实验方法的改进建议等, 对印象很深的实验, 还可写出收获及体会.

写报告一律使用学校统一规定的实验报告用纸, 要用坐标纸画实验曲线.

第一章 测量误差及数据处理

§ 1.1 测量与误差的概念

物理实验作为一门定量的科学,建立在对物理现象和物理量进行观察和测量的基础上.因此,物理实验离不开对物理量的测量.为了进行测量,每一个物理量都有相应的计量单位.测量就是将待测的物理量与相应的计量单位进行比较的过程,其倍数即为物理量的测量值.如测得摆长为 1 m 的 0.865 6 倍,则摆长就为 0.865 6 m.测量时所用的量具和仪器一般都按一定的倍数刻度,以便直接读出测量的数值.

待测物理量的测量可分为两类:一类是用量具或仪器直接读出测量的结果,这一类测量称为直接测量,相应的物理量为直接测得量.另一类是间接测得的,由直接测得量代入公式进行计算得出测量结果.这类测量称为间接测量,相应的物理量称为间接测得量.

按测量条件的不同,测量还可分为等精度测量和不等精度测量.等精度测量是指测量过程中,影响测量的诸因素相同的测量.在测量条件相同的情况下进行的一系列测量是等精度测量.例如,由同一个人在同一仪器上采用同样测量方法对同一被测物理量进行多次重复测量,每次测量的可靠程度都相同,这些测量就是等精度测量,否则就是不等精度测量.

等精度测量,其测量结果的数据处理比较容易;而不等精度测量其数据处理很复杂,所以只有在非用不可的情况下,才采用不等精度测量.在大学物理实验中一般都采用等精度测量,下面介绍的误差理论和数据处理的方法只限于等精度测量.

人们用仪器对某一物理量进行测量时,由于仪器、实验条件等各种因素的限制,测量结果总是与客观存在的实际值——真值之间有一定的偏差,这个偏差值称为测量的误差.它的大小反映了人们的认识接近于客观真实的程度.误差存在于一切测量中,而且贯穿于测量的始终.

测量的目的要设法减少测量误差,尽可能得到被测物理量的最接近值;并估

算出测量结果的误差.为此必须研究误差的性质、来源和规律,以便达到测量的目的.

根据误差的性质和产生的原因,直接测量的误差可分为系统误差、偶然误差(或称随机误差)、过失误差(或称粗差)三种.

一、系统误差

系统误差的特征是其确定性.在同一条件(方法、仪器、环境和观测人均不变)下进行多次测量时,误差的大小和正负或保持不变,或在条件改变时按一定的规律变化.增加测量次数并不能减少这种误差对测量结果的影响.

(一) 系统误差的主要来源

1. 仪器误差

这是由于测量工具或仪器本身的缺陷而产生的,如天平臂不等长,砝码标称质量不准确,秒表的周期或刻度不准等.

2. 方法误差

这是由于实验方法或理论不完善而导致的.如采用伏安法测电阻时(采用不同的联接方法),电表的内阻产生的误差.采用单摆周期公式 $T = 2\pi \sqrt{l/g}$ 测量周期时,摆角引起的误差,这些都是方法误差.

3. 环境误差

这是由于周围环境(如温度、压力、湿度、电磁场等)与实验要求不一致而引起的误差.

4. 人身误差

这是由于观测人员生理或心理特点所造成的误差.如个人的习惯与偏见等造成的误差.

系统误差一般都有较明显的原因,因此可以采取适当的措施加以限制或消除它对测量结果的影响.系统误差是测量误差的重要组成部分,所以发现系统误差,弄清其产生的原因,进而消除它对测量结果的影响则是物理实验的一项重要任务.

(二) 发现系统误差的方法

由于系统误差的性质,系统误差是不能由多次重复测量来发现的,要发现系统误差,必须仔细地研究测量理论和方法的每一步推导,检验和校准每一件仪器,分析每一个实验条件,考虑每一次调整和测量,注意每一个因素对实验的影响,下面介绍几种常用的发现系统误差的方法.

1. 对比的方法

(1) 实验方法的对比.用不同的方法测同一个量,看结果是否一致.如用单摆测得重力加速度 $g = (980 \pm 1) \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$,用复摆测得 $g = (983.0 \pm 0.3) \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$,

在精密测量中有自由落体法测得 $g = (977.63 \pm 0.05) \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$. 三种方法测得的结果不一致, 即它们在所估算的误差的范围内不重合, 一般来说, 这说明至少有两种测量中存在系统误差没有发现或合理估算.

(2) 仪器对比. 用两个电流表接入同一个电路, 读数不一致, 说明至少有一个有明显的系统误差. 如果一个为标准表, 就可以得出另一个表的修正值.

(3) 改变测量方法, 例如把电流反向读数, 度盘转 180° 读数等, 看观察结果是否一致.

(4) 改变实验中某些参量的数值, 测量结果若有单调的变化或规律性的变化, 就说明存在系统误差.

(5) 改变实验条件, 例如, 在电路中将某个元件的位置改变一下, 观察对结果是否有影响.

(6) 换人测量, 可以发现人员的系统误差.

2. 理论分析的方法

(1) 分析实验理论公式所要求的条件在实验测量过程中是否得到满足.

(2) 分析仪器要求的条件是否得到满足, 例如, 0.1 级电阻箱要求在 $(20 \pm 8)^\circ\text{C}$ 环境下使用, 电表要求水平或垂直放置等, 不合要求必然要产生系统误差.

(3) 数据分析法, 当偶然误差很小时, 将测量的偏差 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ 按测量的先后次序排列, 观测 Δx_i 的变化, 如果 Δx_i 呈现规律性变化, 则必然有系统误差存在.

(三) 消除系统误差的方法

1. 消除产生系统误差的根源的方法

(1) 采用符合实际的理论公式.

(2) 严格保证仪器和实验所要求的条件.

(3) 多人做重复实验.

2. 找出修正值, 对测量结果进行修正

使用特殊测量方法, 设计专用仪器, 抵消系统误差, 实验中常用对换法、补偿法、异号法、对称测量法、半周期偶次测量等特殊方法消除系统误差.

上述几种方法是我们今后实验中经常用到的, 我们要通过具体的实验把它们真正地理解和掌握.

二、偶然误差(随机误差)

偶然误差的特征是其随机性. 在同一条件下多次测量某一物理量时, 即使消除了一切引起系统误差的因素, 测量结果也仍然存在着误差, 这种误差称为偶然误差.

(一) 偶然误差的来源

这种误差是由于人的感官灵敏程度和仪器精密度(最小刻度)的限制,周围环境的干扰及随测量而来的其他不可预测的偶然因素所造成的.观测时,目的物对得不准,平衡点定得不准,直接测量结果的显示不可能绝对准确.温度、湿度、电源电压的起伏而引起误差,这些影响一般是微小的而且是混杂出现的,难以确定某个因素产生的具体影响的大小和方向,不能像系统误差那样找出明显的原因并加以限制或消除.

(二) 偶然误差的规律

偶然误差使测量值有时偏大,有时偏小,不可预知.但当对一物理量进行测量次数较多时,这些测量结果将呈现出一定的统计规律性,也就是说偶然误差服从一定的统计分布.偶然误差在测量次数很大时,基本上都可以认为近似遵从正态分布规律,如图 1.1.1 所示.

横坐标 ΔN 表示偶然误差;纵坐标 $P(\Delta N)$ 表示某个误差出现的机会(概率密度).由图可知,其绝对值相等的正负误差出现的概率相等,绝对值小的误差出现的概率大,即有单峰、对称、正负相消、有界性.

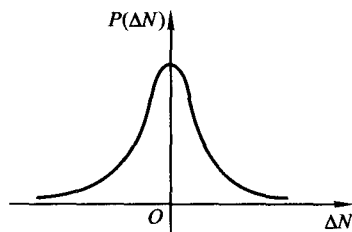


图 1.1.1 正态分布

(三) 测量结果的处理

由偶然误差的统计规律可知增加测量次数取测量的平均值作为测量结果,可以减小误差,提高可靠度.这就是我们做实验时往往重复多次测量取平均值作为测量结果的依据.当然并不是测量次数越多越好,因为增加测量次数必定要延长测量时间,这将给保持稳定的测量条件增加困难.同时,增加测量次数也会给测量者造成疲劳,这又可能引起较大的观测误差.另外增加测量次数只能减少偶然误差而不能减少系统误差.也就是说,只有当个别测量的偶然误差超过该测量的系统误差时,多次测量才有意义,所以实际观测次数不必过多,一般在科学研究中,取 10 至 20 次;而在我们的物理实验中由于时间有限可以取 5 到 10 次(或 3 次以上).当偶然误差小于系统误差时,多次测量就没有意义,可以只做单次测量,总误差就只估算系统误差(一般只估算仪器误差).

三、过失误差(粗差)

过失误差即实验过程中由于过失、错误所产生的误差.凡是用测量时的客观条件不能解释为合理的那些明显歪曲测量结果的误差,均称为过失误差,亦称粗差.这是实验者在观测、记录和整理数据过程中由于缺乏经验、粗心大意、疲劳等原因引起的.

刚开始进行物理实验时,会出现粗差,应在教师指导下不断总结经验,提高

实验素养,防止粗差的出现.

含有粗差的测量值称为异常值或坏值.在正确的测量结果中不应当含有粗差,即所有的坏值都应剔除.

总之,系统误差、偶然误差、过失误差,由于它们的性质不同,来源不同,处理的方法也不同.

§ 1.2 测量的精密度、准确度和精确度

精密度、准确度和精确度都是评价测量结果的量,它们之间既有联系,也有区别.

精密度是衡量多次测量数值之间互相接近程度的量,由偶然误差大小决定,与系统误差无关.测量精密度高是指多次重复测量结果比较集中一致,测量的偶然误差小,系统误差可能较大.

准确度是衡量所测数值与真值接近程度的量.测量的准确度高是指多次测量的平均值偏离真值较小,系统误差也一定小,偶然误差可能不小.

精确度是指所测数值的精密度与准确度的综合情况的量.测量的精确度高是指测量数值既比较集中一致,又在真值附近,即测量的系统误差和偶然误差都比较小.

我们以打靶为例说明上述三个概念的意义.如图 1.2.1 所示.其中左图精密度较高,但准确度不高;中间的图表示精密度较低,但平均的结果可能很接近靶心(在物理量的测量上是指平均值很接近真值),准确度可能很高;右图则表示精密度和准确度都很高,即精确度高.另外,精确度常说成精度,但精度的意思较多.一般对实验结果来说精度多指相对误差的数量级,如 $E = 1.0\%$,则可称精度为 10^{-2} .对仪器来说,精度多指仪器的最小分度值.

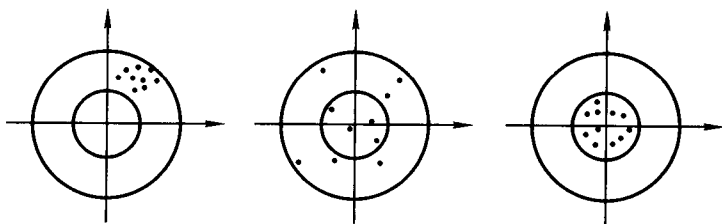


图 1.2.1 测量的精密度、准确度、精确度

直接测量结果的误差是系统误差和偶然误差的总和,它的估算值称为不确定度.精确度高表示测量比较集中在真值附近,即测量的系统误差和偶然误差都

比较小.因此,误差分析的主要任务是限制和消除系统误差,估算偶然误差,提高测量的精确度.

§1.3 正态分布

正态分布是常见的一种连续型分布,在物理实验中,测量值和测量的偶然误差,都可以认为近似遵从正态分布.此外,与测量值和偶然误差有关的,还有一种均匀分布比较常见.

从概率统计的角度来看,物理实验的每一次测量结果均是一个随机事件.某一物理量在一定条件下的实验测值是一个随机变量,测得的每一个数据就是该随机变量的随机数.随机变量 x 的 k 个随机数 $x_1, x_2, \dots, x_k$ 的集合称为随机样本(简称样本).在实验中,随机样本就是一组观测数据. k 称为样本的容量,也就是一组数据的个数或测量的次数.

随机变量的全部可能取的随机数的总和叫做随机总体,简称总体.随机样本的容量 k 足够大(大样本)时,就呈现出随机总体的性质;随机样本的容量不大(小样本)时,其性质是与大样本不同的.我们常常遇到的问题是在有限次测量的情况下,去估计总体的性质或处理测量的结果.完全地描述一个随机变量,不仅要列举出该随机变量的全部可能取值,还要列举出每个随机数(或区间)在全部样本中出现的次数(或概率),就是要指出随机变量的分布.随机变量的分布可以用列表、作图、函数来表示,我们这里仅介绍函数分布.

一、正态分布函数

在一个样本,亦即一组测量数据中,我们把随机变量的取值分成若干个等间距的小区间,以 n_i 表示第 i 个小区间内的数据频数(个数).相对频数 n_i/k ,即该区间内频数占总测量次数 k 的百分率.由于 $\sum_{i=1}^m n_i/k = 1$,其中 m 为等间隔的小区间个数.如果是连续分布,则相对频数为 $p(x) \cdot dx$, $p(x)$ 是随机变量 x 在 x 点附近单位间隔出现的概率, dx 是区间宽度,则有

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1 \quad (1.3.1)$$

这就是归一化条件.其中 $p(x)$ 叫做随机变量 x 的概率密度函数.我们定义

$$P(x) = \int_{-\infty}^x p(x) dx \quad (1.3.2)$$

$P(x)$ 叫做随机变量 x 的分布函数.分布函数 $P(x)$ 的值表示随机变量在 $-\infty$ 到

x 之间的概率 $p(x) = \frac{dP(x)}{dx}$. 若随机变量的概率密度函数为

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad -\infty < x < \infty \quad (1.3.3)$$

或写作

$$p(x) = n(x; \mu, \sigma^2)$$

的形式, 则称这个随机变量 x 的分布为正态分布. 服从正态分布的随机变量称为正态变量.

正态变量的分布函数是

$$P(x) = \int_{-\infty}^x p(x) dx = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \cdot dx \quad (1.3.4)$$

或写作

$$P(x) = N(x; \mu, \sigma^2) = \int_{-\infty}^x n(x; \mu, \sigma^2) \cdot dx$$

式(1.3.3)及(1.3.4)中的 σ 取正值. μ 和 σ 是正态分布的两个参数, μ 和 σ 确定, 这个随机变量的分布也就完全确定. 正态分布的概率密度曲线如图 1.3.1 所示. μ 与正态分布概率密度曲线的峰值相对应. 可以求出 $p(x)$ 曲线下的面积在区间 $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ 内占曲线下全部面积的 68.27%, 即 x 落在区间 $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ 内的概率为 68.27%. 由于 $P(x)$ 是归一化的, 故概率密度曲线下的面积是 1. 因此, σ 越大, 曲线的峰值就越低; σ 越小, 曲线的峰值就越高. 如图 1.3.2 所示.

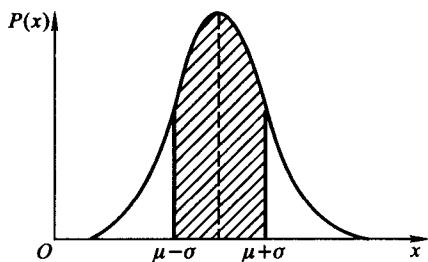


图 1.3.1 正态概率密度曲线

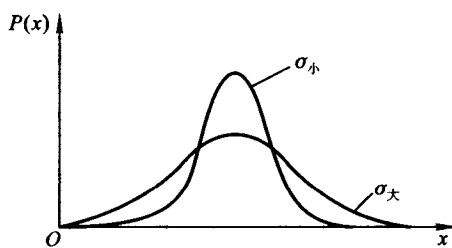


图 1.3.2 不同 σ 的正态分布曲线

物理量 x 的 μ , 就是它的真值, 它的偶然误差为零. 物理量 x , 测量结果落在 $(\mu \pm \sigma)$ 区间的概率为 68.27%. σ 的大小, 反映出测量结果的误差大小, 故把 σ 定义为随机变量 x 的标准误差.

如果已知正态分布的随机变量 x 的两个参数 μ 和 σ , 则可计算出随机变量在