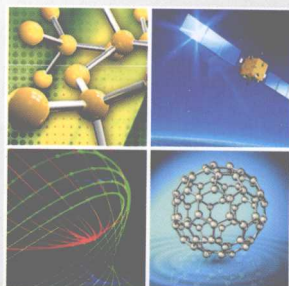




普通高等教育“十一五”国家级规划教材



大学物理实验教程

(第三版)

王云才 主编



科学出版社

www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理实验教程

(第三版)

王云才 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 全书共9章, 包括测量误差、数据处理、基本测量方法、基本器具使用、基本物性测量、基本物理常量测量、电磁学实验、波动光学实验和专题实验等不同层次的内容. 全书以物理测量为主线, 突出实验设计思想, 强调实验物理学科的系统性和完整性. 借鉴和采用相应的国内国际标准与规范, 在数据处理方面体现严谨性与科学性. 全书实验内容丰富, 为不同层次的教学需要提供了一个灵活的平台.

本书可作为高等院校非物理类各专业的物理实验教材或教师参考书.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/王云才主编. —3版. —北京: 科学出版社, 2008
(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)
ISBN 978-7-03-022639-6

I. 大… II. 王… 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(2008)第 124700 号

责任编辑: 胡云志 唐保军/ 责任校对: 刘小梅
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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 2 月第 一 版 印数: 5 501—11 000

2003 年 4 月第 二 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 9 月第 三 版 印张: 18 1/4

2008 年 12 月第七次印刷 字数: 347 000

定价: 28.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

第三版前言

本书是针对高等学校非物理类各专业的大学物理实验教学内容编写而成的。本书已被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书是在第二版的基础上，历时五年，对全书做了全面修订。与第二版相比，本书有以下几方面的变化。

(1) 在结构上，依据测量对象和实验内容进行了循序渐进的安排，全书以物理测量为主线，按照基本器具使用、基本物性测量、基本物理常量测量和专题实验，将全书 9 个章节分为四个层次，并单独在第 3 章系统归纳与提炼了物理实验的基本测量方法，突出和强调实验物理学科的系统性和完整性。

(2) 在内容上，强调了大学物理实验中的科学性和严谨性。如在随机误差处理中，根据实验的实际情况，引入有限次测量的 t 分布来修正正态分布；介绍了对可疑实验数据进行取舍的狄克逊检验法和格鲁布斯准则；采用具有国家标准的有效位数的概念取代有效数字的概念；根据国际通则与学术惯例，提出测量不确定度的估算取两位有效位数；依据国家标准，给出了微小标准差的可忽略判据；根据国际科学技术数据委员会 2006 年推荐值统一了全书中的基本物理常量值。

(3) 在实验项目上，增添了一些能反映现代科学技术发展的代表性实验，如非线性电学混沌、数码照相技术等实验内容，删除了涉及灵敏电流计、检流计等已明显落后于现代技术发展的实验项目，增加了诸如“常用电子元件参数测量”等基本技能训练的项目。

(4) 在数据处理方面，专门介绍了数据处理软件 Excel 和科学作图软件 Origin 在物理实验中的应用，增加了用专业软件处理实验数据的训练，以替代手工坐标纸作图方式。

(5) 在写作思路，突出实验背景和设计思路，淡化实验过程与操作步骤，以便促进学生主动学习、思考与实验。

物理实验课程是一门最能体现集体智慧的课程。本教程在组稿方式上，首次采用了面向国内高校所有实验物理教师的开放性组稿。参加本教程修订编写的教师有（按姓氏笔画排列）：马丽静、王云才、王安帮、王冰洁、王海红、吕玉祥、李凤岐、乔记平、杨玲珍、杨慧岩、张明江、张建忠、张彩霞、陈世杰、赵安庆、武银兰、郭文阁、郭媛、贺虎成、梁丽萍、韩国华、樊林林等。其中，西安石油大学郭文阁教授负责第 5 章内容的编写，河南农业大学赵安庆负责第 6 章内容的编写，沈阳理工大学李凤岐负责第 8 章内容的编写，云南师范大学张雄教授

负责第9章内容的编写，太原理工大学王冰洁、吕玉祥分别负责第4章、第7章内容的编写，王云才撰写了第1~3章的内容，设计了全书的结构，统一了全书的风格，并审校了全书的内容。周希坚教授和陈世杰教授审阅了全书，并提出了许多修改意见。

为修正书中错误和提高质量，在未来的几年内，本书每年度都将进行勘误，恳请使用斧正。同时欢迎其他教师参与本书的修订工作，所有对本书有贡献的教师均会在相应的撰写内容后署名。

笔者的信箱为：wangyc@tyut.edu.cn.

王云才

于太原理工大学格物斋

2008年7月

目 录

第三版前言

绪论	1
第 1 章 测量误差	4
1.1 测量与误差	4
1.1.1 测量及分类	4
1.1.2 误差及分类	5
1.1.3 精密度、正确度和准确度	6
1.2 误差处理	7
1.2.1 随机误差	7
1.2.2 仪器误差	13
1.3 测量不确定度	16
1.3.1 测量不确定度的分类	17
1.3.2 合成不确定度	19
1.3.3 扩展不确定度	20
1.3.4 直接测量不确定度的估算	20
1.3.5 间接测量不确定度的估算	23
1.3.6 微小标准差可忽略判据	27
1.3.7 不确定度分析在实验设计中的作用	27
1.4 实验数据的有效位数	28
1.4.1 有效位数的概念	29
1.4.2 修约规则	29
1.4.3 原始数据的有效位数	30
1.4.4 运算过程中的有效位数	31
1.4.5 测量不确定度的有效位数	31
第 2 章 数据处理	33
2.1 常用的数据处理方法	33
2.1.1 列表法	33
2.1.2 作图法	33
2.1.3 最小二乘法	36
2.1.4 逐差法	38

2.2	用 Excel 软件处理实验数据	39
2.3	用 Origin 软件绘制实验图表	42
	实验 A1 时间测量中随机误差的统计分布	44
第 3 章	物理实验基本测量方法	47
3.1	比较法	47
3.1.1	直接比较法	48
3.1.2	间接比较法	48
3.2	放大法	48
3.2.1	累积放大法	49
3.2.2	机械放大法	49
3.2.3	电学放大法	49
3.2.4	光学放大法	50
3.3	转换法	50
3.3.1	不可测量量的转换	50
3.3.2	不易测量量的转换	50
3.4	模拟法	51
3.4.1	物理模拟	51
3.4.2	类比模拟	51
3.5	平衡法	52
3.6	补偿法	52
3.6.1	补偿法用于测量	52
3.6.2	补偿法用于修正系统误差	52
3.7	干涉、衍射法	53
第 4 章	物理实验基本器具使用	54
4.1	长度测量基本器具	55
	实验 B1 测量物体的几何尺寸	60
4.2	质量测量基本器具	61
	实验 B2 固体与液体密度的测定	64
4.3	时间测量基本器具	68
	实验 B3 刚体转动惯量的测定	68
4.4	温度测量基本器具	74
	实验 B4 用热敏电阻测量温度	76
	实验 B5 pn 结正向压降的温度特性	78
4.5	电学实验常用器具	80
	实验 B6 常用电子元件参数测量	86

实验 B7 电表的改装和校准	91
4.6 光学实验常用器具	95
实验 B8 薄透镜焦距的测定	98
实验 B9 分光计的调节和应用	102
4.7 示波器的使用	110
实验 B10 模拟示波器的使用	110
实验 B11 数字示波器的使用	116
第 5 章 基本物性的测量	121
实验 C1 固体比热容的测量	121
实验 C2 液体比热容的测量	124
实验 C3 气体比热容比 c_p/c_v 的测量	127
实验 C4 液体表面张力系数的测定	131
实验 C5 液体黏滞系数的测定	137
实验 C6 弹性 (杨氏) 模量的测量	143
实验 C7 金属线胀系数的测定	150
实验 C8 电子衍射和物质波	152
第 6 章 基本物理常量的测量	159
实验 D1 重力加速度的测定	159
实验 D2 电子荷质比的测量	162
实验 D3 基本电荷量的测量	165
实验 D4 声速的测量	169
实验 D5 光速的测量	173
实验 D6 玻尔兹曼常量的测量	176
实验 D7 普朗克常量的测量	180
第 7 章 电磁学实验	185
实验 E1 惠斯通电桥测量电阻	185
实验 E2 RL 和 RC 电路的稳态过程	190
实验 E3 电信号的傅里叶分解与合成	195
实验 E4 铁磁材料磁滞回线的测量	199
实验 E5 用霍尔效应测磁场强度	204
第 8 章 波动光学实验	210
8.1 干涉测量专题	210
实验 F1 迈克耳孙干涉仪	211
实验 F2 用牛顿环测平凸透镜的曲率半径	217
8.2 衍射测量专题	221

实验 F3 单缝衍射的光强研究	222
实验 F4 光栅衍射与超声光栅	225
8.3 偏振测量专题	230
实验 F5 光的偏振现象研究	230
实验 F6 用椭偏仪测量薄膜的厚度和折射率	235
第9章 其他专题实验	239
9.1 光谱与能级	239
实验 G1 光栅单色仪测量氢原子光谱	239
实验 G2 弗兰克-赫兹实验测量原子能级	243
实验 G3 金属电子功函数的测定	247
9.2 照相技术	252
实验 G4 胶片照相技术	253
实验 G5 数码照相技术	258
实验 G6 全息照相技术	261
9.3 非线性简介	266
实验 G7 非线性电路产生混沌	267
附录 重要物理实验编年史 (至 1996 年)	271
附表	276
附表一 物理常量表 (CODATA2006 年推荐值)	276
附表二 国际单位制的基本单位	277
附表三 国际单位制的两个辅助单位	277
附表四 国际单位制中 21 个具有专门名称的导出单位	278
附表五 中华人民共和国法定计量单位	278
附表六 部分城市的重力加速度值 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	279
附表七 在标准大气压下不同温度时水的密度	280
附表八 不同温度时水的黏滞系数	281
附表九 水及部分固体的比热容简表	281
附表十 不同温度时干燥空气中的声速 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	281
附表十一 部分固体的线膨胀系数	282
附表十二 20°C 时部分金属的弹性模量	282
附表十三 常用光源的谱线波长	283

绪 论

科学实验是自然科学研究的主要手段,以探索、预测或验证自然科学新现象、新规律为目的.而以教学为目的的大学物理实验具有丰富的实验思想、方法、手段,同时又能提供综合性很强的基本实验技能训练,体现了大多数科学实验的共性,是科学实验的基础.因此,几乎所有的高等学校均将大学物理实验课设置为理工科大学生的必修基础课程,用于训练大学生系统的实验方法和实验技能.大学物理实验课程内容的的基本要求可概括为以下几个方面:

(1) 掌握测量误差与不确定度的基本知识,学会用不确定度对测量结果进行评估.掌握处理实验数据的一些常用方法,如列表法、作图法和最小二乘法,以及用科学作图软件处理实验数据的基本方法.

(2) 掌握基本物理量的测量方法.例如,长度、质量、时间、热量、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、光强度、折射率、电子电荷、普朗克常量等常用物理量及物性参数的测量.

(3) 了解常用的物理实验方法.例如,比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法和干涉、衍射法,以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法.

(4) 能够正确使用常用的物理实验仪器.例如,长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光计、光谱仪、常用电源和光源等常用仪器.

(5) 掌握常用的实验操作技术.例如,零位调整、水平/铅直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查与排除,以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节.

大学物理实验是一门实践性很强的课程,是培养和提高学生科学素质和能力的重要课程之一.通过对以上内容为期一年的训练,学生应逐步实现以下能力的培养:

独立实验的能力 能够通过阅读实验教材、查询有关资料和思考问题,掌握实验原理及方法,做好实验前的准备,正确使用仪器及辅助设备,独立完成实验内容,撰写合格的实验报告.

分析与研究的能力 能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行分析、判断、归纳与综合.

理论联系实际的能力 能够在实验中发现問題、分析問題并学习解决问题的科学方法。

创新能力 能够完成符合规范要求的设计性、综合性内容的实验，进行初步的具有研究性或创意性内容的实验。

要实现以上能力的培养，就需要主动认真地完成好每一个实验。一般来讲，每个实验均可分为实验预习、实验过程和撰写实验报告三个环节，也就是说，在以上三个环节中均需要主动、严谨和认真的态度。具体来讲就是：

1. 实验预习

实验预习的内容可概括为三个问题：做什么？怎么做？为什么？实验预习过程包括以下三方面的内容：

(1) 首先要清楚本次实验的目的和内容是什么？实验原理是什么？用什么途径去测量？为什么这样做？还有无其他的测量途径？

(2) 要明确自己在本次实验中存在哪些不清楚待解决的问题，了解本次实验的注意事项。

(3) 要事先拟定实验步骤和数据表格（如果需要的话）。

2. 实验过程

实验过程是整个实验教学中最核心的环节。在这个过程中要独立完成实验仪器的安装或调整，按正确步骤完成测量全过程，并对实验数据完整记录。在这个过程中应注意以下几点：

(1) 不要急于记录数据。在实验过程中建议先观察或练习，之后再行测量，也可以先粗测再细测，否则可能在测量进行到一半或快结束时才发现，某个调节参数因为初始值选择不合理而出现超出量程或无法调节，导致无法完成整个实验，只好再重新进行测量。

(2) 要注意掌握实验中所采取的实验方法，特别是一些基本的测量方法。因为它是复杂测量的基础，在今后的学习与工作中可能会经常用到。我们在学习时不仅要掌握它的原理，而且要知道它的适用条件及优、缺点，这些知识只有通过亲身实践才能真正体会到。

(3) 要有意识地培养良好的实验习惯。例如，正确记录原始数据和处理数据，注意记录实验的客观条件，如温度、气压、日期等。认真学习操作程序，培养操作习惯。良好的实验习惯是科学素质的具体表现，也是保证实验安全、避免差错的基础。

(4) 不要单纯追求实验数据的正确性。实验能力的快速提高往往发生在实验过程不顺利时。要逐步学会分析、排除实验中出现的某些故障。当实验结果不理

想时,要考虑实验方法是否正确?仪器可能带来多大误差?实验环境等因素对实验有多大影响?

(5) 要注意实验室操作规程和安全规则.随着实验项目的进行,会逐步接触到各种测量仪器,它们有不同的使用要求与工作环境,操作不当可能会损坏仪器,甚至对身体造成伤害.因此要求学生遵守实验的具体操作规程,养成良好的实验习惯.

3. 撰写实验报告

撰写实验报告的过程实际上是对学生的综合思维能力和文字表达能力的训练过程,是今后学生在工作中撰写标书、项目申请书、研究报告、学术论文的基础训练.撰写一份合格的实验报告应注意以下几方面:

(1) 注意实验报告的完整性.一份完整的实验报告应包括实验名称、实验目的、简要的实验原理、实验设备及型号、实验步骤、实验数据、数据处理与误差分析、实验结果、分析与讨论等9个方面.

(2) 实事求是撰写实验报告的基本要求.在撰写实验报告中不得随意对实验数据及其有效数字进行增删.

(3) 对实验数据的处理及对实验结果的分析与讨论是撰写实验报告的重点,也是学生归纳与分析问题的能力具体体现.

大学物理实验课程所涉及的实验项目,绝大多数在物理学发展史上具有重要的地位,这些实验经过多年的改进与调整,已非常适合锻炼大学生对某一实验技术或某一重要的物理实验概念的掌握.从统计学的角度来看,学生在进行物理实验的过程中,利用现有实验设备而发现新的物理现象或规律的概率是非常小的.然而,具有批判与怀疑精神,是科学工作者的一个基本素质.我们期望每个师生都以研究者的态度去探讨最佳实验方案、组装实验装置、分析操作步骤、注意实验条件,这样,几乎所有的物理实验项目都可以按照设计性、研究性实验来完成,而提高和培养主动分析问题、独立解决问题的能力,是学习大学物理实验课程的最主要目标.

(王云才)

第 1 章 测量误差

本章包含 4 节内容. 在 1.1 节“测量与误差”中, 介绍了诸如测量、误差、精密度、正确度和准确度等常用概念, 并对测量和误差分别进行了分类. 在 1.2 节“误差处理”中, 分别就随机误差计算和仪器误差的判断进行了讲解. 对于随机误差, 根据物理实验中所有的实验都是有限次测量的实际情况, 特别引入了有限测量次数下的 t 分布概念; 同时引入狄克逊检验法和格鲁布斯准则两种方法来判断是否可对个别测量数据进行取舍; 对于仪器误差, 重点强调了仪器误差是与置信概率相联系, 而不同的仪器会有不同的误差分布函数. 1.3 节“测量不确定度”中, 详细说明了 A 类和 B 类不确定度的评估与表示, 并讲解了如何在直接测量和间接测量两种不同的测量条件下对测量不确定度进行估算; 同时给出了微小标准差的可忽略判据, 以及简单介绍了不确定度分析在实验设计中的作用. 在 1.4 节“实验数据的有效位数”中, 按照实验过程, 分别介绍了在原始数据记录、数据运算和结果表示时如何进行实验数据修约.

1.1 测量与误差

1.1.1 测量及分类

测量就是通过一定的实验方法、借助一定的实验器具将待测量与选作标准的同类量进行比较的实验过程. 测量结果应包括数值、单位以及结果可信赖的程度(不确定度)三部分.

按照测量方法来划分, 测量分为直接测量和间接测量.

直接测量是指可以用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量. 如用米尺测长度, 用温度计测温度, 用电表测电流、电压等都是直接测量.

间接测量是指通过一个或几个直接测得量, 利用已知函数关系计算出的物理量. 如用单摆法测量重力加速度 g 时, $g = 4\pi^2 L / T^2$, 周期 T 、摆长 L 是直接测量值, 而 g 是间接测量值.

随着实验技术的进步, 很多原来只能间接测量的物理量, 现在也可以直接测量, 如电功率、速度等量的测量.

按照测量条件来划分, 测量又可分为等精度测量和不等精度测量.

等精度测量是指在相同的测量条件下对同一物理量进行的多次测量. 例如,

同一个人用同样的方法,使用同样的仪器对同一待测量进行多次重复测量.尽管每次的测量值可能不相同,但每次测量的可靠性都是一样的,没有理由认为哪一次(或几次)的测量值更可靠或更不可靠.

不等精度测量是指在不同的测量条件(如使用仪器的不同、测量方法的改变或测试人员的变更)下,对同一物理量的多次测量.不等精度测量的每次测量结果的可靠性都不同.

实际上,一切物质都在运动中,没有绝对不变的人和事物,只要其变化对实验的影响很小乃至可以忽略,就可以认为是等精度测量.以后说到对一个量的多次测量,如无另加说明,都是指等精度测量.

1.1.2 误差及分类

物理实验就是对一些物理量进行测量的过程.任何待测的物理量在一定客观条件下总存在着一个真实的值,称其为该物理量的**真值**(true value).但是,由于实验理论的近似性、实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性、环境的不稳定性等因素的影响,待测量的真值实际上是不可能通过测量准确复现,也永远无法准确得知的.也就是说,测量结果和真值之间总有一定的差异,这种差异定义为**测量误差**.测量误差可以用绝对误差表示,也可以用相对误差表示.设测量值 x 的真值为 a ,则

$$\text{绝对误差}(\delta) = x - a \quad (1.1.1)$$

$$\text{相对误差}(E_r) = \frac{|\text{绝对误差}(\delta)|}{\text{真值}(a)} \times 100\% \quad (1.1.2)$$

由于真值是不能确知的,所以测量值的误差也不能确切知道,因此测量的任务就是给出被测真值的最佳估计值,并估算出这种最佳估计值的可靠程度.

根据误差的性质和产生原因通常将误差分为系统误差、随机误差和异常值三种.

1. 系统误差

系统误差(systematic error)是指在等精度的重复测量中误差保持恒定,或以可预知的方式变化的误差.

系统误差的来源主要有以下几方面:

(1) 由于仪器本身的缺陷或没有按规定的条件使用仪器而造成的误差.例如,仪器的零点不准造成的误差,等臂天平两臂不等长造成的误差,在 20°C 的条件下标定的标准电阻在 30°C 的条件下使用造成的误差等.

(2) 由于测量所依据的理论公式本身的近似性,或实验条件不能达到理论公式所规定的要求,或测量方法所带来的误差.例如,利用单摆测量重力加速度

g ，所依据的公式为 $g=4\pi^2 L/T^2$ ，此公式成立的条件是单摆的摆角趋于零，而在测量周期时又必须要求有一定的摆角，这就决定了测量结果中必然含有系统误差。

(3) 由于测量者本人的生理或心理特点所造成的误差。例如，测量时间时，测量者可能有计时超前或落后的偏好；在对准标志时，可能存在总是偏左或偏右的习惯。

系统误差通常是实验误差的主要来源。在测量条件不变时，系统误差基本上具有确定的大小和方向。当测量条件改变时，系统误差通常会按照一定的规律变化。增加测量次数并不能减小系统误差。

我们一般不能发现系统误差是否存在。但是，在一些测量过程中，我们可以根据系统误差的性质，选择适当的测量方法，使测量值中的系统误差相互抵消，从而消除系统误差对测量结果的影响。例如，天平只有在两臂严格等长时，砝码的质量才等于被测物体的质量。而事实上不可能做到天平两臂的严格等长。为了消除这种系统误差，可以采用所谓复称法称衡，从而抵消天平两臂不等长引起的系统误差。

2. 随机误差

随机误差 (random error) 是指在相同的测量条件下，多次测量同一物理量时，误差时大时小、时正时负，以不可预定的方式变化着的误差。它是由人的感官灵敏度和仪器精度的限制、周围环境的干扰以及一些偶然因素的影响而产生的，其典型的特征是随机性。例如，用毫米刻度的米尺去测量某物体的长度时，往往将米尺对准物体的两端并估读到毫米的下一位读数值，这个估读出的数值就存在着一定的随机性，也就带来了随机误差。

虽然随机误差无法控制和排除，但是，当在相同的实验条件下，对被测量进行多次测量时，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的随机误差作出估算，这就是在实验中往往对某些物理量要进行多次测量的原因。

3. 异常值

异常值 (outlier) 又称为粗大误差或过失误差，是由于观测者不正确地使用仪器，观察错误或记录错数据等不正常情况引起的误差。它会明显地歪曲客观现象，在数据处理中应将其剔除。所以，在作误差分析时，要估算的误差通常只有系统误差和随机误差。

1.1.3 精密度、正确度和准确度

即使是对同一物理量进行等精度测量，其测量结果也可能有很大的不同，图 1.1.1 显示了打靶过程中弹点的三种典型分布。这里我们引入精密度、正确度和准确度三个概念，因为在一些文献中有时会用这三个概念来定性描述测量结果。

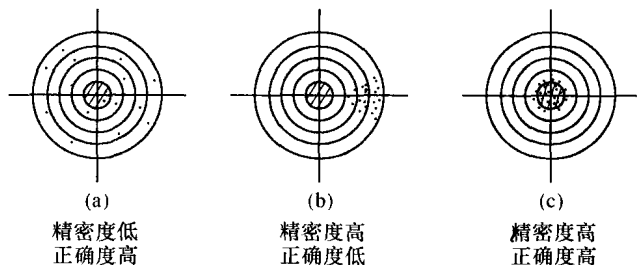


图 1.1.1 精密度、正确度和准确度示意图

精密度 (precision) 是对测量结果的分散性或重复性的评价, 反映随机误差大小的程度. 精密度高即测量结果的重复性好, 测量值密集, 分散性小, 随机误差小, 但精密度一词已不常用.

正确度 (correctness) 也是一个已不常用的概念. 表示测量结果中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小. 它与精密度是两个不同的概念, 正确度高并不能确定测量结果的分散性及重复性的程度. 图 1.1.1 (a) 表示正确度高但数据分散, 精密度差; 图 1.1.1 (b) 表示正确度低但精密度高.

准确度 (accuracy) 反映测量结果与被测真值之间的一致程度, 它也是一个定性的概念, 说明系统误差与随机误差的综合大小的程度. 准确度高意味着系统误差与随机误差均小, 测量结果既精密又正确. 在图 1.1.1 (c) 中, 精密度与正确度均高, 即准确度高.

目前, “精度” 一词的含义尚未统一, 因此, 尽量避免使用 “精度” 一词.

1.2 误差处理

1.2.1 随机误差

1. 算术平均值

在相同的测量条件下, 对某一物理量 X 进行 n 次重复测量. 假设系统误差已被减弱到可以被忽略的程度, 因随机误差的存在而得到包含 n 个测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$. 因为是等精度测量, 我们无法断定哪个值更可靠, 但当测量次数足够多时, 随机误差为正的数据与随机误差为负的数据可大致抵消, **算术平均值** (最佳值) (arithmetic mean) 可作为被测量的最佳估计值.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2.1)$$

算术平均值并不是真值, 但它比任意一次测量值的可靠性都高, 因此, 在大

学物理实验中, 我们总是用多次测量结果的算术平均值来表示被测物理量的量值.

2. 标准偏差与正态分布

算术平均值代表了测量结果的最佳估算值, 但无法说明测量结果的分散性或重复性. 为了表征测量值的分散程度需要引入**实验标准偏差** (experimental standard deviation, 常用 s 或 σ 来表示) 的概念, 实验标准偏差可由贝塞尔 (Bessel) 公式计算得到

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.2.2)$$

σ 的值代表了随机误差的分布特征, σ 大表示测量值分散, 随机误差大; σ 小表示测得的值很密集, 随机误差小, 测量准确.

当测量次数很大时, 如测量次数趋于无穷多时, 绝对误差 $\delta = x_i - \bar{x}$ 的概率密度分布成为一连续曲线, 其数学形式为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1.2.3)$$

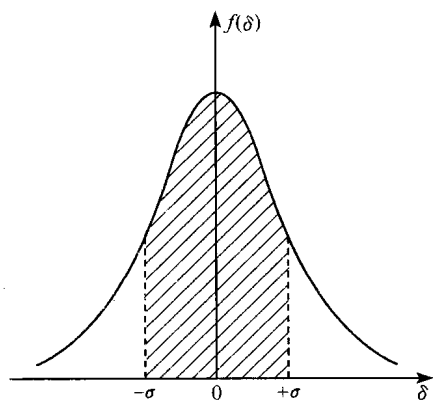


图 1.2.1 正态分布曲线

$f(\delta)$ 的概率密度分布如图 1.2.1 所示, 横坐标为绝对误差 $\delta = x - \bar{x}$, 纵坐标为绝对误差的概率密度分布函数 $f(\delta)$. 概率密度分布函数的意义为在误差 δ 附近, 单位误差间隔内误差出现的概率.

概率密度分布函数满足式 (1.2.3) 时, 又称为正态分布. 正态分布是连续型随机变量中最重要、最常用的分布. 一般而言, 若某个待测量 X 是很多随机因素之和, 而每个因素所起的作用均很微小, 则 X 为服从随机分布的变量. 多次等精度独立测量即满足正态分布. 例如, 在工业生产线上, 当设备、技术、原料、工艺、操作等可控制的生产条件都相对稳定, 不存在明显的系统误差影响时, 同一生产线上生产出的大量相同产品的质量指标近似服从正态分布.

正态分布具有以下特点:

- (1) 对称性. 符号相反, 但绝对值相等的绝对误差, 其出现的概率相等.
- (2) 单峰性. 绝对误差为零处的概率密度最大.
- (3) 有界性. 非常大的正误差或负误差出现的可能性几乎为零.
- (4) 抵偿性. 当测量次数非常多时, 正误差和负误差相互抵消, 误差的代数