

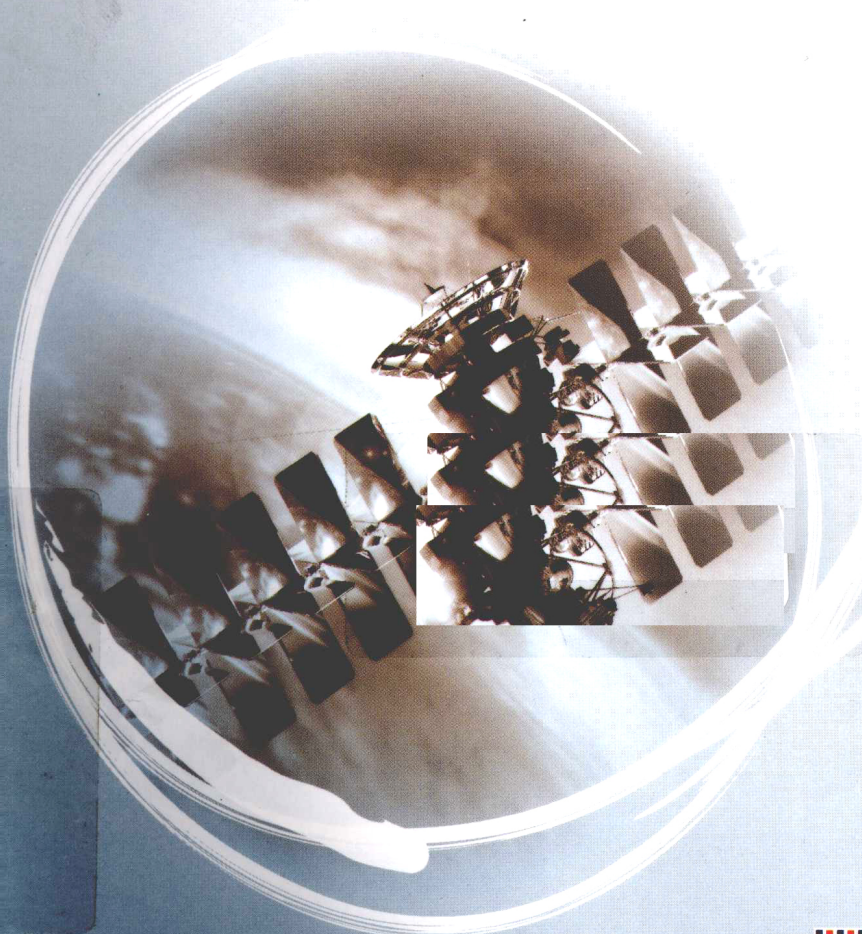


普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

■ 杨延欣 赵春华 主编 ■



 科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

	杨延欣	赵春华	主编
	李永升	陈林峰	
常大虎	宗征军	胡秋波	副主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是根据教育部2008年制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合我校多年的物理实验教学经验编写而成的。全书共分5章。第1章绪论介绍物理实验的地位、作用及物理实验课的教学环节；第2章为物理实验的基础知识，较系统地介绍了测量不确定度与实验数据处理；第3~5章依次选编了力学、热学、电磁学、光学及近代物理实验共44个。本书每章都采取由浅入深、循序渐进、先基础后综合的方式编排实验项目，适用面广泛，有丰富的选择余地和灵活的运用空间。

本书可作为高等理工科学校各专业物理实验课程的教学用书，也可供相关实验技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/杨延欣, 赵春华主编. —北京: 科学出版社, 2011

(普通高等教育“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-03-030220-5

I. ①大… II. ①杨… ②赵… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第020855号

策划: 王超

责任编辑: 王纯刚 张振华/责任校对: 马英菊

责任印制: 吕春珉/封面设计: 东方人华平面设计部

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>

百善印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年2月第一版 开本: 787×1092 1/16

2011年2月第一次印刷 印张: 15 1/2

印数: 1-3 000 字数: 359 000

定价: 27.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈百善〉)

销售部电话 010-62134988 编辑电话 010-62148522

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

物理学在人的科学素质培养中具有重要的地位，实验是物理学的基础。大学物理实验是理工科学生进入大学后较早学习到的一门系统全面的实验课程，是学生实际技能训练的开端。进入 21 世纪以来，随着实验教学改革的不断深入，大学物理实验课程在实验技术、实验内容等方面都在不断地更新变化。为了提高学生的科学素质，培养学生的创新能力，大学物理实验教学既要使学生得到基本的实验技能训练，又要使学生在综合能力方面得到提高。这就要求大学物理实验的教学内容必须兼顾基础、综合、近代物理以及工程技术等方面。

本书参照教育部 2008 年制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合普通工科院校的特点，在多年教学实践的基础上，参考并吸收了我院及兄弟院校物理实验的经验而编写的。本书每章都采取由浅入深、循序渐进、先基础后综合的方式编排实验项目，适用面广泛，有丰富的选择余地和灵活的运用空间。本书力求做到实验原理简明扼要、实验公式推导完整、实验方法清晰合理、数据处理要求规范。本书较全面地阐述了测量误差、不确定度以及数据处理的基础知识。在不确定度理论的介绍中，从大学物理实验教学的实际出发，由简到详，便于学生学习和具体应用。

本书由杨延欣、赵春华任主编，李永升、陈林峰、常大虎、宗征军、胡秋波任副主编。杨延欣负责全书的统稿，赵春华、李永升、陈林峰、常大虎、宗征军、胡秋波负责初审。具体分工为：杨延欣编写第 1 章、4.3、4.16、4.17、5.4、5.11、5.12、5.13、附录。赵春华编写 2.1、2.3、2.4、2.5、2.6、4.9、5.3、5.8；李永升编写 3.10、3.11、3.12、5.6、5.7；陈林峰编写 2.2、2.7、3.1、4.1、3.7、4.4；常大虎编写 5.1、5.2、5.5、5.9、5.10；宗征军编写 3.5、3.8、3.15、3.16、4.14；胡秋波编写 3.9、4.5、4.7、4.8、4.13；程春晓编写 3.6、4.10、4.12、4.15；韩东峰编写 3.4、3.13、3.14、5.14；王德全编写 4.2、4.6、4.11；杨慧琴编写 3.2、3.3。

在本书的编写过程中，得到了洛阳理工学院数理部的大力支持，同时，我院和一些兄弟院校的实验教材也为本书的编写提供了很好的借鉴，借此机会表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促，作者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2010 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 物理实验课的地位和任务	1
1.2 物理实验课的基本环节	1
1.3 物理实验室规则	3
第 2 章 物理实验基础知识	4
2.1 测量与误差	4
2.2 测量的基本方法	12
2.3 不确定度及其简化估算	15
2.4 测量结果的不确定度表示	18
2.5 有效数字及其表示	22
2.6 数据处理的基本方法	24
2.7 实验仪器的基本调整技术	29
第 3 章 力学与热学实验	32
3.1 力学与热学实验基本测量仪器	32
3.2 固体物体密度的测量	37
3.3 气垫导轨上的实验	40
3.4 重力加速度的测定	47
3.5 用三线摆测物体的转动惯量	52
3.6 测量金属丝的杨氏弹性模量	57
3.7 用焦利秤研究弹簧振子的简谐振动	60
3.8 弦线上驻波的研究	63
3.9 声速的测定	66
3.10 冰的溶解热的测定	72
3.11 固体比热的测定	77
3.12 热功当量的测定	80
3.13 液体黏度的测量	83
3.14 金属线胀系数的测量	86
3.15 热敏电阻器电阻温度特性的测量	88
3.16 温度传感器的特性测量	91

第 4 章 电磁学实验	95
4.1 电磁学实验基本测量仪器及规程	95
4.2 变阻器电路的安排	101
4.3 万用表的使用	106
4.4 设计和组装欧姆表	110
4.5 电表的改装和校正	114
4.6 电学元件伏安特性的测定	117
4.7 单臂电桥测电阻	120
4.8 双臂电桥测电阻	123
4.9 测量毫安表内阻	126
4.10 用电位差计测电源电动势	127
4.11 灵敏电流计特性研究	130
4.12 电位差计校验毫安表	134
4.13 示波器的原理及使用	139
4.14 用模拟法测绘静电场	148
4.15 用霍尔元件测磁场	153
4.16 测量铁磁材料的磁滞回线	158
4.17 交流电桥	161
第 5 章 光学与近代物理实验	169
5.1 光学实验基础知识	169
5.2 薄透镜焦距的测定	172
5.3 菲涅耳双棱镜测波长	176
5.4 用阿贝折射仪测定液体的折射率	180
5.5 等厚干涉的应用	185
5.6 分光计的调整与使用	189
5.7 光栅衍射	198
5.8 偏振光的研究	204
5.9 迈克尔逊干涉仪的调整与使用	209
5.10 用法布里-珀罗 (F-P) 干涉仪测波长差	214
5.11 密立根油滴实验	217
5.12 光电效应法测普朗克常数	222
5.13 弗兰克-赫兹实验	227
5.14 全息照相技术	231
附录 常用物理数据	236
主要参考文献	242

第 1 章 绪 论

1.1 物理实验课的地位和任务

物理学是一门实验科学，在物理学的发展过程中，实验是决定性的因素。发现新的物理现象，寻找物理规律，验证物理定律等都只能依靠实验。离开了实验，物理理论就显得苍白无力，就会成为“无源之水，无本之木”，不可能得到发展。

大学物理实验课是对学生实验技能进行训练的一门课程。它是理工科学生进入大学后在实验方面受到系统训练的开端，也是后续实验课程的基础。同时，物理实验在培养学生良好的个人素质及科学世界观方面，也起着潜移默化的作用。因此，物理实验是十分重要的一门学科。

本课程的主要任务是：

1) 在实验思想、方法、技能和数据处理方面对学生进行训练，培养学生独立研究问题和解决问题的能力。

① 掌握实验的物理思想及其理论依据。

② 掌握物理实验中的基本实验方法、操作技术，掌握基本测量仪器的原理、调整技术和使用方法。

③ 能够正确记录和处理数据，分析实验结果，并按照要求撰写实验报告。

④ 初步掌握自行设计和完成实验任务的基本步骤及方法。

⑤ 通过对实验现象的观察、对物理量的测量和分析，加深对物理学基本概念、规律和理论的理解。

2) 培养和提高学生的科学实验素质，要求学生具有理论联系实际的学习方法、实事求是的科学态度、严谨踏实的工作作风、团结协作的精神、爱护公物的优良品德。

1.2 物理实验课的基本环节

物理实验有着自身的特点和规律，有自己的实验理论、实验方法和实验技能。物理实验是在教师指导下由学生独立进行的课程。整个实验过程可分为三个基本环节。

1.2.1 实验前的预习

预习是上好实验课的基础和前提。只有认真做好预习，才能了解实验的关键所在，才能积极主动地去进行实验，并在有限的实验时间内完成实验任务。在实验课前要仔细阅读实验教材或有关资料，写出预习报告。预习报告应包括如下内容：

1) 实验目的。扼要说明该实验所要解决的中心问题。

2) 实验仪器。说明所需用的仪器名称、数量、规格。

3) 实验原理。简要阐述实验所依据的物理定律或主要公式, 如在电学和光学实验中, 要求画出电路原理图和光路简图。

4) 实验步骤。拟定测量计划、实验步骤或操作程序。

5) 数据表格。设计好测量数据记录表格, 以便实验时填写。

1.2.2 实验过程

学生进入实验室后应遵守实验室规则。实验时首先要清点仪器, 然后按照确定的实验步骤, 严肃认真地进行实验。一般来说, 实验过程是按以下三个步骤进行的。

(1) 仪器的调试和熟悉

进行测量前, 必须对仪器进行调试, 使之满足正常的工作条件, 同时要熟悉仪器的使用方法, 操作规程。以下列举几点注意事项, 实验时应参照执行:

1) 安装仪器时, 应尽量做到便于操作、观察和读数。

2) 灵敏度较高的仪器(如物理天平、灵敏电流计等)不进行测量时应处于制动状态。

3) 拧动仪器的旋钮或转动部分时动作要平稳, 不要用力过猛。

4) 注意仪器的零点, 使用前要进行调零或记下修正量。

5) 砝码、光学器件, 为了保持其测量精确度和光洁度, 不要用手去摸, 更不允许随使用布去擦。

6) 秒表、温度计、光学元件等小件仪器, 在用完之后要放到规定的盒中。

7) 使用电学仪器时要注意电源及仪器的极性、额定电压、额定电流、量限等, 在连接好电路后, 需经教师检查, 待允许后方能接通电路。

8) 不要随便动用其他实验小组的仪器或互换仪器, 仪器有问题时要及时向教师报告。

9) 实验结束后要将仪器整理、恢复到实验前的状态。

(2) 观察和测量

仪器调试完成, 一切就绪之后, 可以进行正式测量。对实验中只要求观察的内容, 要进行认真、反复的观察, 注意实验的条件和现象, 对要求测量的实验内容也应先进行定性的观察, 然后再开始测量。

(3) 做好实验记录

实验记录是计算与分析问题的依据, 在实际工作中则是宝贵的资料, 记录应记在专用的记录本或纸上。对于记录应注意以下几个方面:

1) 记录的内容包括日期、时间、合作者、所用仪器、必要的环境条件、简图、原始数据、有关的现象、随时发现的问题。

2) 原始数据是指从仪器上直接读出的未经任何运算的数值。

3) 观测时, 对随时观测到的有关现象、发现的问题及读取的数据要立即进行记录, 这样可减少差错。

4) 除有明确理由, 确定某一数据有错误而不予记录外, 其他数据(包括有疑问的)一律记录。对有疑问的数据可作上标记, 但对任何已记录的数据, 无论是否“错误”一律不得涂改(因为当时认为是“错误”的数据有时经过比较后发现是正确的),

出现异常数据时,应增加测量次数。

5) 在作完全部记录后,自己应先认真检查一遍记录结果,如发现问题,应重新记录有关内容。然后,将实验数据交教师审阅签字。最后,整理还原仪器,结束实验。

1.2.3 撰写实验报告

实验报告是实验工作的全面总结。撰写实验报告时,要求内容简明扼要、统一完整,文字通顺,字迹端正,图表规范,数据完备,运算清晰,结论明确,讨论深刻。实验报告的内容包括如下几项。

(1) 实验名称

(2) 实验目的

(3) 实验器材

说明所用仪器名称、型号、规格和数量。

(4) 实验原理

简要叙述有关物理内容(包括电路图、光路图或实验装置示意图)及测量中依据的主要公式,式中各量的物理含义及单位,公式成立应满足的实验条件等。

(5) 实验内容

根据实际的实验过程写明关键步骤和有关注意事项。

(6) 数据处理

实验数据采用表格记录,发生的现象用文字记录,所作图表应符合规范。写出数据处理的主要过程,并按实验教材中误差计算的具体要求计算误差。实验结果应按标准格式书写。

(7) 讨论和思考

完成实验后的思考与练习题,对实验关键问题的研究体会,实验的收获和建议,对实验结果进行必要的讨论和误差来源分析。

1.3 物理实验室规则

1) 带上预习报告,经老师检查同意后方可进行实验。

2) 遵守实验纪律,不得迟到早退,不得下位、串组,不得乱扔垃圾,保持实验室的清洁和卫生。

3) 使用电源时,务必经教师检查线路后才能接通电源。

4) 爱护仪器。进入实验室不能擅自搬弄仪器,仪器要轻拿轻放,实验中要严格按照仪器操作规程操作,如因违规操作而损坏仪器,要照章赔偿。公用工具用完后应立即归还还原处。

5) 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。

6) 每次实验结束后,留值日生打扫实验室,清倒废物,检查电源开关,关好门窗。

7) 实验报告应在实验后一周内交至实验室。

第 2 章 物理实验基础知识

本章主要介绍了测量与误差的概念、测量的基本方法、不确定度及其简化估算、测量结果的不确定度表示、有效数字及其表示、数据处理的基本方法、实验仪器的基本调整技术等实验基础知识，作为进入实验前的基础准备。这些知识不仅是在后面的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。但是由于这部分内容涉及面很广，深入地讨论它已超出了本课程的范围。所以本章只对一些所必须用到的概念、公式、结论做初步的介绍，以满足后面教学的需要。

2.1 测量与误差

2.1.1 测量的概念

进行物理实验时，不仅要定性地观察物理变化的过程，而且要用物理的方法定量地研究各种物理规律，因此必须定量地测量出有关物理量的大小。

广义而言，测量就是用实验手段对客观事物获取定量信息的过程，具体地说，测量就是将预定的标准与未知量进行定量比较的过程和结果。也就是用一定的量具或者仪器，通过一定的方法，与被测物比较，由测量所得数值和计量单位组成测量结果。因此，测量的必要条件是被测物理量、标准量及操作者。测量结果应是一组数据和单位，必要时还要给出测量所用的量具或仪器、测量方法及条件等。例如，测量一个钢球的直径时，选用的标准是毫米，测量结果是毫米的 9.694 倍，则直径的测量值为 9.694mm，使用的量具为螺旋测微计，测量环境温度是 20.5℃。

2.1.2 测量的分类

1. 直接测量和间接测量

实验中根据测量方法的不同，可以将测量分为直接测量和间接测量。

(1) 直接测量

将被测物理量直接与同一类测量量进行比较的方法称直接测量。若被测物理量直接由测量仪器的读数决定，仪器的刻度就是被测物理量的尺度，这种方法成为直接读数法。如用米尺测量长度。直接测量按照测量的次数又可以分为：单次直接测量和多次直接测量。

(2) 间接测量

许多被测物理量不能直接与标准的单位尺度进行比较，而要根据被测物理量和几个直接测得量的函数关系求出被测物理量的测量即为间接测量，例如测量物质的密度，先测量出质量 m 和体积 V ，再计算密度 ρ 。在实际工作中，大多数测量问题是通过间接手段加以解决的。

需要注意的是,一个物理量到底是直接测得量还是间接测得量,要由具体的实验过程来确定,而不是一成不变的。

2. 等精度测量和不等精度测量

按照测量的条件,测量还可分为等精度测量和不等精度测量。

(1) 不等精度测量

仪器的不同、方法的差异、测量条件的改变以及测量者素质的参差都会造成测量结果的变化,这样的测量就是不等精度测量。作为各次不等精度测量结果,取平均值没有意义。

(2) 等精度测量

同一个测量者,用同样的方法,使用同样的仪器并在相同的条件下对同一物理量进行多次测量,称为等精度测量。在实际测量过程中:只要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。

在物理实验中,常用的测量方式主要是单次测量、等精度测量和间接测量。当测量精度要求不高时用单次测量,测量精度要求比较高时用等精度测量,在无法进行直接测量时才用间接测量。

2.1.3 基本测量方法

测量用的方法很多,常用的有直读测量法、比较测量法、替代测量法、放大测量法、平衡测量法、模拟测量法、几何光学测量法、干涉测量法和衍射测量法等。

2.1.4 测量误差

1. 真值与测量值

任何物质自身都具有各种各样的特性,反映这些特性的物理量是客观存在的。在一定条件下,具有不以人的意志为转移的客观真实数值。我们把一个待测物理量在一定条件下客观上所具有的真实数值称为真值。只有通过完善的测量才有可能获得真值,但实际测量是不完善的,因此实际测量就不能获得真值,它只是一个理想的概念。在物理实验中常以所测量物理量的公认值、理论值或较高准确度的一次测量或多次测量的平均值近似地代替其真值。这些值叫做“约定真值”,它们与真值之差可以忽略不计,如三角形内角之和恒为 180° 。

通过实验所得到的量值称为测量值,具体分为如下三种:

1) 单次测量值。若只能进行一次测量,(如变化过程中的测量),或者对测量的要求不高及受仪器的准确度限制时。可以用单次测量值近似的表示被测量的真值。

2) 算术平均值。对多次等精度重复测量,可以用所有测量值的算术平均值来替代真值。数理统计理论可以证明,算术平均值是被测量真值的最佳估计值。

3) 加权平均值。当每个测量值的可信程度或测量准确度不等时,为区分每个测量值的可靠性(即重要程度),对每个测量值都给与一个“权”数,最后的测量结果用带“权”数的测量值求出的平均值表示,即加权平均值。

测量值与被测量的真值之间的一致程度即为测量准确度。测量准确度是一个定性

概念，反映了随机误差与系统误差的合成误差的大小，不要与仪表的准确度等级相混淆。

2. 测量误差的概念及分类

测量的目的是要获得待测量的真值。但是实践证明：由于任何测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察力等，都不能做到绝对严密，所以一个待测量的测量值和其真值就不能完全相同，它们之间总会存在或多或少的差异。这种差异在数值上的表示称为测量误差，简称误差。误差自始至终存在于一切科学实验和测量过程之中，测量结果都存在误差，这就是误差公理。

在测量误差必然存在的情况下，测量的任务是：设法将测量值中的误差减至所要求的范围之内；求出同一测量条件下，多次测量得到的待测量的约定真值（最佳值）；对测量结果在一定范围内的可信赖程度作出评价。

(1) 绝对误差和相对误差

误差按表达方式分为绝对误差和相对误差。

1) 绝对误差：

绝对误差 = 测量值 - 被测量的真值，用公式表示为

$$\delta = x_i - x_0。$$

式中， δ 表示误差， x_i 表示某次测量值， x_0 表示真值。

这里需要注意的是，绝对误差不是误差的绝对值！绝对误差可正可负，具有与被测量相同的量纲和单位，它表示测量值偏离真值的程度。

2) 相对误差：

$$\text{相对误差 (E)} = \left| \frac{\text{测量的绝对误差}}{\text{被测量的真值}} \right| \times 100\%。$$

相对误差是无单位的纯数。因为常用百分数表示，故又称为百分误差。

3) 引用误差：

$$\text{引用误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{量程 (或测量上限)}} \times 100\%。$$

引用误差是一种简化的、实用方便的相对误差。一般用它来表示仪器、仪表的准确度等级。

(2) 系统误差、随机误差及粗大误差

根据误差的性质、来源及对测量结果的影响，误差可分为系统误差、随机误差及粗大误差。

2.1.5 系统误差

在相同条件下（指方法、仪器、环境、人员）多次重复测量同一物理量时，误差的大小和符号（正、负）均保持不变或按某一确定的规律变化，这类误差称为系统误差，它的特征是确定性。系统误差是恒差，因此增加测量次数是不能消除系统误差的，而一个实验结果是否正确，往往就在于系统误差是否被发现并尽可能消除，因此对系统误差不能忽视。

1. 系统误差的来源

系统误差是在测量过程中由于偏离测量条件或测量方法不完善等因素引入的误差，来源于以下几个方面：

(1) 由仪器不确定度产生的系统误差

由于所用仪器量具本身构造上的不完善或仪器未经很好校准而产生的误差。如天平两臂不等长、仪器的刻度不准确、仪器的零点没有校准等。

(2) 由测量环境产生的系统误差

由于外界环境条件变化所引入的误差。如温度、压力、电磁场等没有达到预计的情况或发生变化。环境性质的变化不仅会影响仪器的工作条件和各测量量之间的关系，甚至会影响被测量本身。

(3) 由测量公式产生的系统误差

由于测量公式本身的近似性或没有满足理论公式所规定的实验条件而产生的误差。

例如，单摆周期公式 $T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$ 的成立条件是摆角 $\theta < 5^\circ$ ，由于在实验时，单摆的摆角也很难满足该实验条件，所以用此公式计算 T 时，计算本身就带来了误差。又如用伏安法测量电阻时，忽略了电表内阻的影响；称重时忽略了空气浮力的影响，测长时未考虑热胀冷缩的因素等。

(4) 由操作人员产生的系统误差

由于操作人员本身生理和心理特点造成的误差。例如，由于个人分辨能力的高低，固有习惯使读数始终偏大或偏小，由于个人反应速度的不同使测量某一物理量时的操作总是有超前或滞后的趋势。

2. 系统误差的分类

根据上述系统误差的来源情况可将系统误差分为可定系统误差和未定系统误差。

(1) 可定系统误差

可定系统误差是指在测量中大小、正负可以确定的误差，在测量值中应消除。例如，米尺零刻线被磨损或弯曲，若不注意，会产生零点不为零的可定系统误差。因此测量时应该避开零刻度线，用中间的某整刻度线作为测量的起始点，再读出被测物的终止点，两点相减就避开了零点不准的可定系统误差。再如千分尺（亦称螺旋测微器）零点不为零，测量时应先记下零点值 d_0 ，再测量被测量值的大小 d_1 ，两者相减 $(d_1 - d_0)$ 的结果就消除了千分尺由于零点读数不为零所带来的可定系统误差。

(2) 未定系统误差

未定系统误差是指在测量中只能确定大小，不能确定正负的误差。如仪器不确定度产生的测量误差。一般将其合成到测量结果的不确定度中。例如，千分尺的示值、数字毫秒计的不确定度、分光计的不确定度、电表的精度（即准确度等级）等产生的测量误差都是未定系统误差。

3. 判定系统误差存在的方法

(1) 理论分析法

从原理和测量公式上找原因，看是否满足测量条件。例如，用伏安法测量电阻时

实际中电压表内阻不等于无穷大、电流表内阻不等于零，会产生系统误差。

(2) 实验对比法

改变测量方法和条件，比较差异，从而发现系统误差。例如调换测量仪器或操作人员，进行对比，观察测量结果是否相同而进行判断确认。

(3) 数据分析法

分析数据的规律性，以便发现误差。例如残差法，对一组等精度测量数据，通过计算偏差、观察其大小和比较正、负号的数目，可以寻找系统误差。

4. 可定系统误差的消除和减小方法

(1) 交换法

用天平两次称衡同一物体质量时，第二次称衡将被测物与砝码交换。两次称量结果分别为 m_1 、 m_2 ，则取 $m = \sqrt{m_1 m_2}$ 为最终称量结果，可以克服天平不等臂误差。

(2) 替代法

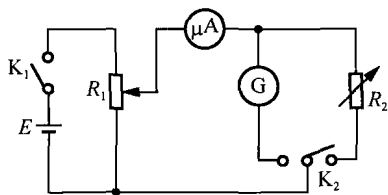


图 2.1-1 用替代法测电表内阻电路图

在电表改装实验中测量表头内阻时，如图 2.1-1 所示，首先将 K_2 与表头回路接通，调节 R_1 使微安表指到整刻度，记下该电流值，再将 K_2 与电阻箱回路接通，保持 R_1 不变，调节电阻箱 R_2 阻值，使微安表读数和记下的电流值相同，此时电阻箱的阻值就等于被测表头的内阻，这种方法避免了微安表内阻引入的误差。

(3) 零示法

电桥、电位差计均用这种方法，指零仪器两端等电位（即示零）时测量。减小仪器误差和避免指零仪器内阻引入的误差。

(4) 异号法

在霍尔效应实验中改变霍尔片上的电流方向进行测量，消除不等位误差。

(5) 半周期法

分光计的双游标读数采用的就是这种方法，用来克服分光计刻度盘和游标盘的圆心与仪器主轴的轴心不重合所引起的偏心误差。

2.1.6 随机误差

在测量时，即使消除了系统误差，在相同条件下多次重复测量同一物理量时，各次测得值仍会有些差异，其误差的大小和符号没有确定的变化规律。但如大量增加测量次数，其总体（多次测量得到的所有测量值）服从一定的统计规律。这类误差称为随机误差，它的特征是偶然性。

随机误差在测量过程中也是不可避免的，它来自于许多难以控制的不确定的随机因素。这些随机因素有空气的流动，温度的起伏，电压的波动，不规则的微小振动，杂散电磁场的干扰，以及实验者感觉器官的分辨能力、灵敏程度和仪器的稳定性等。增加测量次数可减小其影响。

1. 随机误差的正态分布规律

假设系统误差已消除, 且待测物理量本身又是稳定的前提下。一个物理量进行 n 次等精度测量时, 且 $n \rightarrow \infty$ 时, 随机误差将服从统计规律, 即高斯分布, 又称正态分布。其分布曲线如图 2.1-2 所示, 且满足高斯方程

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

式中, δ ($\delta = x_i - x_0$) 为每次测量的随机误差; $f(\delta)$ 为随机误差的概率密度, 表示在误差 δ 附近单位误差区间内, 误差 δ 出现的概率。

σ 是函数 $f(\delta)$ 的特征量, 其值为曲线拐点的横坐标 (与随机误差 δ 有相同的量纲), 是表示随机误差分散程度的重要参数, 称为正态分布的标准误差。其表达式为

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

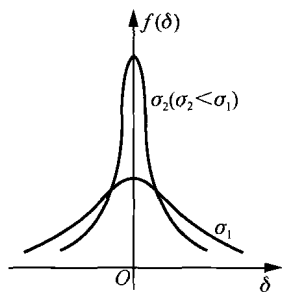


图 2.1-3 σ 对 $f(\delta)$ 的影响示意图

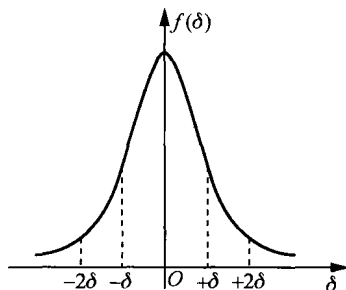


图 2.1-2 正态分布曲线

由式 (1) 可知, 随机误差正态分布曲线的形状取决于 σ 值的大小, 如图 2.1-3 所示。 σ 值愈小, 曲线愈陡且峰值愈高, 这说明绝对值小的误差占优势, 且测量值的重复性好, 离散性小; 反之, 曲线比较平缓且峰值较低, 测量值的重复性差, 离散性大。

从函数图形上看, 坐标原点对应于误差 $\delta = 0$, 曲线下的总面积表示各种大小 (包括正负) 误差出现的概率之和, 其值为 1。

为了统计随机误差的概率分布, 将概率密度函数在以下区间积分, 得到随机误差在相应区间的概率值分别为

$$P(-\infty, +\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta) d\delta = 1 \quad (3)$$

$$P(-\sigma, +\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\delta) d\delta = 0.683 \quad (4)$$

$$P(-2\sigma, +2\sigma) = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(\delta) d\delta = 0.954 \quad (5)$$

$$P(-3\sigma, +3\sigma) = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(\delta) d\delta = 0.997 \quad (6)$$

式 (3) 表明: 当 $n \rightarrow \infty$ 时任何一次测量值与平均值之差落在 $[-\infty, +\infty]$ 区间的概率为 1, 满足归一化条件。式 (4) 表明: 落在 $[-\sigma, +\sigma]$ 区间的概率为 0.683, 即表示置信概率为 68.3%, 记为 $P = 0.683$ 。式 (5) 表明: 落在 $[-2\sigma, +2\sigma]$ 区间的概率为 0.954, 即表示置信概率为 95.4%, 记为 $P = 0.954$ 。式 (6) 表明: 落在 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 区间的概率为 0.997, 即表示置信概率为 99.7%, 记为 $P = 0.997$ 。

这就是标准误差的统计意义, 在测量次数无限多时, 测量偏差的绝对值大于 3σ 的概率仅为 0.3%, 对有限次测量, 这种可能性是微乎其微, 因此可以认为是测量失误, 该测量值是“坏值”应予以剔除。这就是很有用的 3σ 判据。

从图 2.1-2 和以上讨论可以看出正态分布的随机误差具有以下特征：

- 1) 单峰性：绝对值小的误差出现的概率大于绝对值大的误差出现的概率。
- 2) 对称性：绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等。
- 3) 有界性：在一定的测量条件下，绝对值很大的误差出现的概率趋于零。
- 4) 抵偿性：标准误差的算术平均值随着测量次数 $n \rightarrow \infty$ 而趋于零。

一般来说，适当增加测量次数，并以各次测量的算术平均值作为测量结果时可以减小随机误差。

2. 测量列的标准偏差

在实际测量中受各种条件的限制，测量不可能无限多次的进行，只能是有限次。如果把无限多次测量结果称为总体，有限次测量（无论是几次，甚至是一次）得到的测量值都是从这个总体中抽出的一个样本。样本在一定程度上必然带有总体的信息。因此可以利用样本来估计总体分布的两个特征值：真值及标准误差。

(1) 算术平均值是真值的最佳估计值

从理论上说：在测量条件不变的情况下，对待测量测量了 n 次，得到包含 n 个测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的测量列。由于是等精度测量，我们无法判断哪个值更可靠。概率理论可以证明该测量列的算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

是最佳值（或称最近真值样本的期望值），是最可以信赖的。且当 $n \rightarrow \infty$ 时， $\bar{x}$ 将无限地接近真值。

(2) σ 最近估计值——样本标准偏差 S_x

我们把某一次测量值 x_i 和平均值 $\bar{x}$ 之差称为该次测量的残差，即 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ ， Δx_i 有正有负，常用“方均根”法对它们进行统计，得到的结果就是该测量列的标准偏差（即样本标准偏差），记作 S_x

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (8)$$

表示由于随机误差的存在，测量列中各测量值之间的分散程度。其统计意义是指：当测量次数足够大时（如大于 10 次），测量列中任一测量值与平均值的偏差落在 $[-S_x, +S_x]$ 区间的概率为 0.683，这一公式称为贝塞尔公式。

(3) 平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$

一般情况下，在多次测量之后，是以平均值来表达测量结果的，而平均值本身显然也是个随机量。设想：对某待测量进行多组多次等精度测量时，每组测量列的平均值 $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3 \dots$ 不尽相同，只是随机误差已经很小。由概率理论可以证明算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差为

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

其统计意义为：待测物理量落在的 $(\bar{x}-S_{\bar{x}}, \bar{x}+S_{\bar{x}})$ 概率为 0.683；落在区间 $(\bar{x}-2S_{\bar{x}}, \bar{x}+2S_{\bar{x}})$ 内的概率为 0.954；落在 $(\bar{x}-3S_{\bar{x}}, \bar{x}+3S_{\bar{x}})$ 区间内的概率为 0.997。

(4) 有限次 ($n \leq 10$) 测量的情况及 t 因子

在实际测量过程中，测量次数是有限的，而且 $n \leq 10$ 情况很多，此时概率密度曲线变得平缓，随机误差分布规律从正态分布变为 t 分布。又称学生分布。正态分布与 t 分布的区别如图 2.1-4 所示。

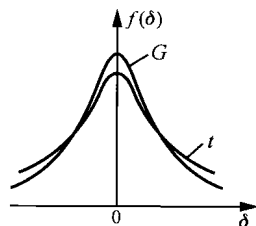


图 2.1-4 t 分布与高斯分布曲线的比较

对有限次测量结果，要保持同样的置信概率（如 $P=0.683$ ），显然要扩大置信区间，即把 $S_{\bar{x}}$ 乘以一个大于 1 的因子 t ，使此情况下的置信区间内仍能保证有 68.3% 置信概率。置信因子 t 与测量次数的关系如表 2.1-1 所示。

表 2.1-1 置信因子 t 与测量次数的关系

次数 置信因子	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
$t_{0.683}$	1.84	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.04
$t_{0.95}$	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.23	2.09
$t_{0.99}$	9.92	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.25	3.17	2.86

在测量次数很少时，测量结果应表示成 $\bar{x} \pm t_{0.683} \cdot S_{\bar{x}}$ ($P=0.683$) 或 $\bar{x} \pm t_{0.95} \cdot S_{\bar{x}}$ ($P=0.95$) 或 $\bar{x} \pm t_{0.99} \cdot S_{\bar{x}}$ ($P=0.99$)。

3. 粗大误差

明显地歪曲了测量结果的异常误差称为粗大误差。它是由于没有觉察到实验条件的突变，仪器在非正常状态下工作，无意识的不正确操作等因素造成的。含有粗大误差的测量值称为可疑值，或异常值、坏值。在没有充分依据时，绝不能按主观意愿轻易地去除，应该按照一定的统计准则慎重地予以剔除。

在测量中，若一组等精度测量值中的某值与其他值相差很大，在处理这类数据时该值不能计算在内，应运用 3σ 判据予以剔除。

2.1.7 仪器误差

测量是用仪器和量具进行的，而仪器或量具本身也不是理想的，使用时也会带来测量误差。仪器误差是指在正确使用仪器的条件下，测量所得结果的最大误差限。任何仪器都存在误差，通常说仪器的精确度高，是指使用该仪器时测量值的误差较小，而仪器的灵敏度高是指由于测量量的微小变化将引起仪器示值的较大变化。二者之间存在内在的联系。

仪器误差也包含系统误差和随机误差两个部分，究竟哪个因素为主，要具体分析。一般级别较高的仪器主要是随机误差，级别较低的仪器则主要是系统误差。物理实验中所遇到的多数仪器都是由厂家或计量机构参照国家标准给出了精确等级或允许误差