

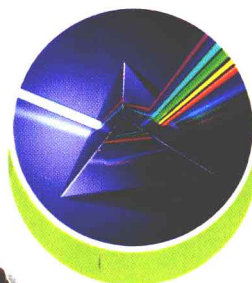
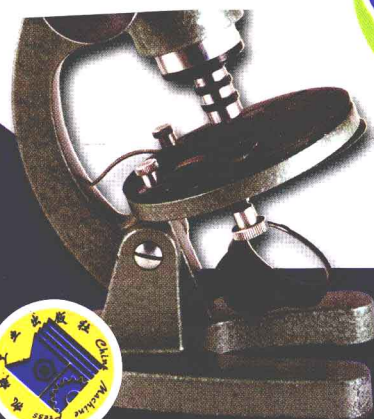


普通高等教育“十二五”规划教材

# 大学物理实验

EXPERIMENTS OF  
UNIVERSITY PHYSICS

◎ 李柱峰 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

# 大学物理实验

李柱峰 编著



机械工业出版社

本书根据教育部高等学校理工科类大学物理实验课程教学的基本要求(2010年版),结合五邑大学多年来物理实验教学改革和课程建设的成果和经验编写而成。内容涵盖力学、热学、电磁学、光学、近代物理等物理学各领域,适合理工科非物理专业物理实验课程教学使用。在内容的选择上力求适应新时期对人才培养的要求,以培养应用型人才为目标,培养学生实验技能为主线,在加强基础的前提下,增加综合性、应用性强的新型实验,着重实验思想和实验方法的引导,并力求把理论与实际应用相结合。

本书可作为高等院校理工科非物理类各专业大学物理实验课程的教学用书或参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/李柱峰编著. —北京:机械工业出版社,2012.12  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-111-40249-7

I. ①大… II. ①李… 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(2012)第259716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:张金奎 责任编辑:张金奎 李 乐

版式设计:霍永明 责任校对:杜雨霏

封面设计:张 静 责任印制:张 楠

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2013年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15.5印张·384千字

标准书号:ISBN 978-7-111-40249-7

定价:28.80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

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

随着科学技术的迅猛发展和物理实验教学改革的不断深入,大学物理实验教学从教学理念、教学内容到实验技术都在不断更新变化。五邑大学是一所地方综合性大学,其中理工科专业的学生数量约占学生总量的一半,物理实验中心承担着非常重要的教学任务。为了适应新时期国家对人才培养的需要,我校已经明确提出了以培养服务于地方的应用型人才为目标,因此实验和实践环节起着越来越重要的作用。本书是结合我校多年来的物理实验教学实践、教学改革和课程建设经验,根据教育部高等学校理工科类大学物理实验课程教学的基本要求(2010年版),在参考原教材(2005年)部分内容的基础上,经过反复实践、积累经验、不断改进、充实完善编写而成的。

本书共编入28个实验,内容涵盖力学、热学、电磁学、光学、近代物理等物理学各领域。本书在内容选择上力求适应新时期对人才培养的要求,兼顾五邑大学学生的特点,以培养学生能力为主线,在加强基础的前提下,增加了不少综合性、应用性强的新型实验,如液晶电光效应实验、磁阻效应法测量磁场、溶液旋光率与折射率的测定、半导体制冷实验、望远镜和显微镜的设计与组装等,使学生对新技术及其应用有一个初步的认识;增加了一些在物理学史上具有重要意义的经典物理实验,如波尔共振实验、夫兰克-赫兹实验、空气热机实验等,以开拓学生视野,激励他们去探索物理规律,认识物理世界。每个实验的原理叙述方面,着重实验思路的引导,循序渐进,突出逻辑思维的过程。另一方面,考虑到学生在中学阶段的实际基础,每一个实验尽量详细地介绍了所使用仪器的基本原理与使用方法,并配以大量的插图和示意图,以便学生预习。在绪论部分,详细介绍了误差理论和数据处理的基本方法,并给出相关计算例题,在每个实验中要求学生运用这些理论知识进行实验数据的处理和分析,得出相应的结论。

参与本书部分实验审校工作的有李远兴(实验3、7、22、28),周党培(实验8、10),张梅(实验1),徐维(实验16),罗坚义(实验14、15),龙拥兵(实验19),赵丽特(实验17),范东华(实验13),何鑫(实验2)、陈毅湛(实验4、5),陈海澜(实验18、20),白钰(实验26)。教材其他未列出部分及体系框架的撰写、统稿和定稿由李柱峰完成。王忆教授审阅了全书,朱慧群副教授等提出了许多宝贵意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,参考了部分我国物理实验教学工作者编著的教材、著作和最新研究成果,有些已在参考文献中列出,有些未能列出,在此向他们一并表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中难免会有错漏之处,谨请读者指正,以便改进,不胜感激。

作 者

# 目 录

## 前言

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 绪论                                  | 1   |
| 第一部分 物理实验课的地位、作用和教学任务               | 1   |
| 第二部分 测量误差及数据处理                      | 4   |
| 实验 1 扭摆法测定物体转动惯量                    | 29  |
| 实验 2 用拉伸法测定金属材料的弹性模量                | 38  |
| 实验 3 波尔共振实验                         | 44  |
| 实验 4 声速的测定                          | 53  |
| 实验 5 声波多普勒效应的研究                     | 63  |
| 实验 6 半导体制冷实验                        | 74  |
| 实验 7 空气热机实验                         | 82  |
| 实验 8 示波器的原理和使用                      | 90  |
| 实验 9 半导体二极管特性的研究                    | 101 |
| 实验 10 $RC$ 、 $RL$ 、 $RLC$ 电路暂态特性的研究 | 111 |
| 实验 11 霍尔效应法测量磁场                     | 118 |
| 实验 12 铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线的智能化测量          | 128 |
| 实验 13 磁阻效应法测量磁场                     | 136 |
| 实验 14 分光计的调节与应用——光栅衍射法测光波波长         | 143 |
| 实验 15 用分光计测定三棱镜折射率                  | 153 |
| 实验 16 用牛顿环测曲率半径                     | 157 |
| 实验 17 迈克尔逊干涉仪                       | 163 |
| 实验 18 光的偏振实验                        | 167 |
| 实验 19 溶液旋光率与折射率的测定                  | 176 |
| 实验 20 光衍射相对光强分布的测量                  | 183 |
| 实验 21 音频信号光纤传输技术实验                  | 188 |
| 实验 22 超声光栅测定声速                      | 197 |
| 实验 23 夫兰克-赫兹实验                      | 204 |
| 实验 24 液晶电光效应实验                      | 211 |
| 实验 25 PN 结正向压降与温度关系的研究与应用           | 219 |
| 实验 26 CCD 特性综合实验                    | 224 |
| 实验 27 两量程电表的设计、制作和校准                | 233 |
| 实验 28 望远镜和显微镜的设计与组装                 | 237 |
| 附录                                  | 242 |
| 附录 A 常用物理学常数表                       | 242 |
| 附录 B 物理量的单位(国际单位制)                  | 242 |
| 参考文献                                | 244 |

# 绪 论

## 第一部分 物理实验课的地位、作用和教学任务

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的自然科学。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是其他自然科学和工程技术的基础。

在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现了一系列科学的世界观和方法论,深刻影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活,是人类文明的基石,在人才的科学素质培养中具有重要的地位。

物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

物理实验课程有着它自身的特点,物理实验的知识、方法、技能和习惯是高等工程技术人员所必须具备的,需要由浅入深、由简到繁加以培养和锻炼。物理实验课是理工科各专业一门必修的独立设置的基础实验,是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端,它在培养学生用实验手段去发现、观察、分析和研究问题,最终解决问题的能力方面起着重要作用,也为学生后续课程的学习及独立地进行科学实验研究、设计实验方案和提出新的实验课题打下了良好的基础。

### 1. 地位

- (1) 物理实验课是高等学校理工科类专业对学生进行基本科学实验的必修基础课程。
- (2) 物理实验课是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。

### 2. 作用

- (1) 物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、手段,同时能够提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力、提高实验素质的重要基础。
- (2) 它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

### 3. 任务

- (1) 培养学生的基本科学实验技能,提高学生的科学实验基本素质,使学生初步掌握实验科学的思想和方法。培养学生的科学思维和创新意识,使学生掌握实验研究的基本方法,提高学生的分析能力和创新能力。
- (2) 提高学生的科学素质,培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风,认真严谨的科学态度,积极主动的探索精神,遵守纪律,团结协作,爱护公共财产的优良品德。

对科学实验能力培养的基本要求包括:

- (1) 独立的学习能力:能够自行阅读实验教材或资料,做好实验前的准备;
- (2) 独立进行实验操作能力:能够借助教材或仪器说明书,正确使用常用仪器;

(3) 分析与研究能力：能够运用物理学理论，对实验现象进行初步分析判断；

(4) 书写表达能力：能够正确记录和处理实验数据、绘制曲线、说明实验结果、撰写合格的实验报告；

(5) 创新与实验设计能力：能够完成简单的设计性实验。

## 一、物理实验课程教学基本要求

### 1. 掌握测量误差的基本知识，具有正确处理实验数据的基本能力

(1) 测量误差与不确定度的基本概念，能逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估。

(2) 处理实验数据的一些常用方法，包括列表法、作图法和最小二乘法等。随着计算机及其应用技术的普及，应包括用计算机通用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、温度、湿度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、发光强度、折射率、电子电荷、普朗克常量、里德伯常量等常用物理量及物性参数的测量，注意加强数字化测量技术和计算技术在物理实验教学中的应用。

### 3. 了解常用的物理实验方法，并逐步学会使用

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. 掌握实验室常用仪器的性能，并能够正确使用

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、分光仪、光谱仪、常用电源和光源等常用仪器。

各校应根据条件，在物理实验课中逐步引进在当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术，例如激光技术、传感器技术、微弱信号检测技术、光电子技术、结构分析波谱技术等。

### 5. 掌握常用的实验操作技术

例如：零位调整、水平/铅垂调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、根据给定的光路图正确接线、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。

## 二、怎样做好物理实验——物理实验课的三个基本环节

物理实验是一门实践性课程，它的教学方式以实践训练为主，学生应在教师的指导下，充分发挥主观能动性，加强自己的独立实践能力的训练。因此，要做好物理实验，必须抓好如下三个环节。

### 1. 课前预习

每次实验前，应预习实验教材和相关资料，了解实验目的，理解实验原理和实验方法，熟悉实验内容和步骤，根据自己的理解，写好实验预习报告。

预习报告的内容包括：

(1) 实验名称、实验目的、仪器用具；

(2) 实验原理简述和主要公式，请用自己的话归纳，要求简要明了；简单的各种必要的图，如电路图或光路图等（此项是预习考核重点，评定预习等级分）；

(3) 可先归纳实验基本步骤；

(4) 设计实验数据表格, 每人应准备一个数据记录本并画好数据记录表格, 用来记录测量数据。

## 2. 课堂操作

实验的过程是学生自己动手、动脑、实际操作仪器进行实验测量的过程, 它是对学生的实验技能、预习情况的综合检查。为了顺利地进行实验, 下面介绍一下实验进行的基本过程:

(1) 认识仪器。熟悉一下将要使用的仪器和设备等的型号、构造特点、使用方法、测量误差等, 并做好需要的记录。

(2) 熟悉操作步骤。对照实物研究实验操作程序, 想一想原方案是否合理。此时, 不要急于动手, 以免造成错误。

(3) 安装、调试实验仪器。首先对单个仪器进行检查调试, 然后再按实验要求安装。应使用指定仪器, 未经许可不得随意调换。仪器安装好后, 必要时应请教员检查。

(4) 实验试做和观察。为了事先纠正实验过程中可能出现的问题或错误, 避免数据测量时出现问题, 要重视实验试做。

(5) 数据测量和记录。实验开始后, 要仔细观察、认真思考、及时测量、准确读取和记录数据。读取数据要符合读数规则, 记录的数据符合有效数字规则, 并要注明单位。发现异常现象、仪器故障及损坏要及时报告, 以便解决。**原始的数据记录不能用铅笔作记录。**如果确实是记错了, 也不要涂改, 应轻轻划上一道, 在旁边写上正确值(错误多的, 需要重新记录), 使正误数据都能清晰可辨, 以供在分析结果和误差时参考。

(6) 数据检查。要求的数据测量完成后, 不要忙于撤除仪器, 首先自己检查数据的合理性, 然后交教师检查。如果问题较大, 应重做。

(7) 结束实验。经教员检查同意后, 方可拆除仪器, 放回原位摆放整齐, 搞好清洁卫生, 填写《仪器使用情况登记表》, 待教师审阅签字后方可离开实验室。

(8) 遵守实验室规章制度。

## 3. 实验报告

撰写实验报告是对实验工作的全面总结。实验报告要求书写工整, 格式规范, 文字叙述简明、通顺, 数据齐全、清晰, 图表正确。要求进行必要的误差分析与数据处理, 表示实验结果, 回答思考题并进行有关的问题讨论(如找出影响结果的主要因素, 减小误差应采取的措施, 对实验中观察到的现象的解释, 改进实验的建议和心得体会等); 实验报告要求学生独立撰写, **实验报告应在实验后一周内交给任课教师, 在教师批改后及时更正实验报告中的错误。**

实验报告的内容:

(1) 实验名称、日期、学号、组别、座位号、实验者和合作者等。

(2) 实验目的和要求(预习完成)。

(3) 实验仪器设备(在实验时记下型号和规格)。

(4) 实验原理: 用自己的语言, 扼要写出实验原理(实验的理论依据)和测量方法要点, 说明实验中必须满足的实验条件, 数据处理时要用的主要公式。画出必要的实验原理示意图、电路图、光路图。

(5) 实验基本步骤: 主要实验步骤(以上 1~5 项应预习完成)。

(6) 数据记录和处理: 根据要研究问题的需要设计好实验数据表格, 在表格中列出全部原始测量数据 (不能用铅笔记录), 表格应有标题。按测量最佳估值的计算、被测量的不确定度的计算和结果表示的顺序, 正确计算和表示测量结果。要求作图的, 应按作图规则用坐标纸画出。

(7) 实验讨论: 通过分析, 说明通过实验得到的收获, 提出改进建议, 指出误差原因, 对实验中观察到的异常现象进行解释与讨论, 回答课后思考题等。

(8) 将原始数据记录粘贴在实验报告内一同交上, 没有原始数据的实验报告不计成绩。报告中如果有严重错误, 或字迹不清楚, 则需重做。

(9) 结论: 一定要将结论写清楚。

## 第二部分 测量误差及数据处理

### 第一节 测量与误差

#### 一、测量的概念

在科学实验和生产实践中, 常常要对物理量进行测量, 以便定量地研究它们之间的关系。所谓测量, 就是将被测量的物理量与作为计量单位的标准量进行比较, 确定其量值的过程。量值是用数和适宜的单位表示的量, 例如: 1.5m、18.5℃、4.6kg 等。

被测量的测量结果用数值 (标准量的倍数)、标准量的单位 (物理实验中一般采用 SI 制) 以及结果可信赖的程度 (不确定度) 来表示。没有单位的物理量是没有意义的!

根据获取测量数据的方式不同, 可将测量分为直接测量和间接测量。根据测量条件的不同, 可分为等精度测量和不等精度测量。

##### 1. 直接测量

直接测量是指被测量可以直接从测量仪器或量具上读出其数值的测量。例如, 用米尺测量长度、天平称量质量、电表测量电压和电流等。

##### 2. 间接测量

间接测量是指被测量值不能直接从所使用的测量仪器上读出来, 而是利用若干个直接测量通过一定函数关系计算出被测量的数值。例如, 测量空心圆柱体的体积  $V$ , 就是由直接测量圆柱体的高  $h$ 、内径  $d$  和外径  $D$ , 通过关系式  $V = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)h$  而计算出来的,  $V$  是间接测量量。有些物理量只能用间接测量才能得到其值, 而有些物理量既可用间接测量得到, 也可用直接测量得到。例如, 用伏安法测电阻, 先测出通过电阻的电流和两端的电压, 再根据欧姆定律算出电阻的值, 此时电阻的测量是间接测量。如果用欧姆表测量, 可直接读出电阻的值, 这时电阻的测量是直接测量。因此, 一个被测量的数值采用哪种测量方法得到, 要视实验的具体情况和要求而定。

##### 3. 等精度测量

等精度测量是指在相同条件下对同一被测量进行多次重复测量, 即在测量仪器、测量方法、测量人员、测量环境均不变的情况下对同一物理量进行重复测量, 所得到的测量值都有相同的精度, 或者说它们具有相同的可信赖程度。

#### 4. 不等精度测量

不等精度测量是指各次测得数据的精度不同,即每次测量的条件、环境、仪器、人员等都变动,使测得数据的精度不同。

等精度测量与不等精度测量的数据,在处理方法上有所不同,在以下的讨论中所涉及的测量数据均为等精度测量的情况。

测量条件是指一切能影响测量结果、本质上又可控制的全部因素。测量条件包括:进行测量的人、测量方法、测量仪器及其调整方法、环境条件等。环境条件是指测量过程环境的温度、湿度、大气压力、气流、振动、辐射强度等。

### 二、测量方法

在物理实验中,常用的测量方法如下。

#### 1. 比较法

比较法是将被测量与相关标准量进行直接或间接比较,得到测量值的方法。例如米尺、电表都是根据比较法设计而成的仪器。

#### 2. 放大法

放大法是通过某种方法将被测量放大后,再进行测量。例如外径千分尺(旧称螺旋测微计)测长——把螺纹细分而进行放大。

#### 3. 补偿法

补偿法是用在标准量具上产生的精度很高的某种效应,完全补偿由待测量产生的同种效应,得到未知量的方法。例如电位差计。

#### 4. 替代法

替代法是将被测量与已知量先后接入同一测量仪器,在不改变仪器的工作状态下,使两次测量仪器的示值相同,则认为被测量等于已知量。例如曹冲称象。

#### 5. 累积法

当被测量的物体的量值太小不能够用测量仪器直接测量单一的物体时,则测量相同规格的物体集合再求其平均值的方法称为累积法,如测量一张纸张的厚度,一根头发丝的直径,一颗订书针的质量等。

#### 6. 偏位法

偏位法是被测量直接作用于测量机构使指针等偏转或位移以指示被测量的大小。

#### 7. 零位法

被测量与已知量进行比较,使两者之间的差值为零,这种方法称为零位法。例如电桥、天平、杆秤、检流计。

#### 8. 转换法

对无法直接测量的量,转换为对该量所产生的某种效应进行测量的方法称为转换法。例如测酸、碱、盐溶液的浓度,用压电传感器测驾驶员座椅的受力分布。

#### 9. 非电量电测

将非电量转换为电量进行测量的方法称为非电量电测。例如利用声波反射,判断前方障碍物。

#### 10. 光干涉计量法

光干涉计量法是现代精密计量的基础。

### 三、测量误差

当我们对某一物理量进行测量时，由于受测量仪器、实验条件以及种种因素的局限，测量不可能无限精确，测量结果与真值（客观真实值）之间总有一定差距，测量值只能是真值的近似值，即存在着测量误差。测量误差不等于测量错误，它反映的是我们的认识接近于客观真实的程度，是测量精度的体现。测量误差存在于一切测量活动中，而且贯穿测量过程的始终，每使用一种仪器，每进行一次测量，都会引进误差。测量所依据的方法和理论越繁多、所用的仪器装置越复杂、所经历的时间越长，引入误差的机会和可能性就越大。测量时，我们只能尽量地减小测量误差的影响，而不能完全消除它。

因此，分析测量中可能产生的各种误差、尽可能地消除其影响、并对测量结果中未能消除的误差作出估计，就是物理实验和许多科学实验中必不可少的工作。误差存在于一切测量过程的始终，这一事实已为一切从事科学实验的人们所公认，故称为误差公理。

测量误差简称为“误差”，以  $\Delta x$  表示。误差定义为测量值  $x$  与真值  $A$  之差，即

$$\Delta x = x - A \quad (0-1)$$

在现实的一切测量过程中，由于始终存在着测量误差，因而测量不到任何物理量的真值。那么怎样最好地表示测量结果、使它最合理地代表真值呢？常用的是在测量条件不变的情况下，以多次（ $n$  次）测量的算术平均值  $\bar{x}$  作为测量的最佳值来代替真值  $A$ （这里我们约定，在今后的讨论中，一般都用  $\bar{x}$  代替  $A$ ），这样，式（0-1）可以写成：

$$\Delta x = x - \bar{x} \quad (0-2)$$

为了定量地反映测量误差的大小，可采用下面两种表达方式，即绝对误差和相对误差来表示。

#### 1. 绝对误差

绝对误差是指被测量的测量结果与其最佳值之差，即式（0-2）中的  $\Delta x$ 。它表示的是测量值偏离其实际值的大小。从式（0-2）可知， $\Delta x$  不仅有大小还有量纲，它的量纲与待测量  $x$  的量纲一致。如果测量结果的  $\Delta x$  大，则表示测量结果的准确度较差，与实际结果偏离较大。因此我们测量时要尽量减小测量误差。

深入分析便可发现，用绝对误差来表示某两个不同大小的物理量的测量误差时，不能比较出两者测量结果的精确程度。例如，测量某两个物体的质量，得出结果分别为  $\bar{m}_1 = 1.00\text{g}$ ， $\bar{m}_2 = 100.00\text{g}$ ，如果这两个测得值的绝对误差都是  $\Delta m_1 = \Delta m_2 = 0.01\text{g}$ ，即绝对误差相等，但实际上，这两个测量值的精确程度是完全不同的，后者显然要精确些。因此，有必要引入相对误差的表示方法。

#### 2. 相对误差

相对误差是指某一待测物理量的绝对误差与其测量的最佳值之比，它是没有量纲的，通常写成百分比的形式：

$$E_r = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \times 100\% \quad (0-3)$$

引入相对误差的概念以后，可以计算出上面质量测量的相对误差为  $E_{r1} = \frac{\Delta m_1}{\bar{m}_1} = 1\%$ ，

$E_{r2} = \frac{\Delta m_2}{\bar{m}_2} = 0.01\%$ ，显然  $E_{r1} > E_{r2}$ ，后者的测量要精确些。

如果待测量的理论值或公认值已知,也可用百分误差评价测量结果的好坏。即

$$\text{百分误差 } \gamma = \frac{\text{测量值} - \text{公认(理论)值}}{\text{公认(理论)值}} \times 100\% \quad (0-4)$$

#### 四、测量误差的分类

测量误差按其性质和产生的原因分类,可以分为系统误差和随机误差两大类。

##### 1. 系统误差

系统误差的特点是:总是使测量结果向一个方向偏离,它有固定的大小,或是按一定规律变化。系统误差的来源主要有以下几个方面:

###### (1) 仪器误差

这是由于仪器本身不可能制造得无限精密,总是存在着某些缺陷造成的。如仪器的零点不准、放大器的非线性、仪器本身的灵敏度和分辨率有限等。

###### (2) 理论(方法)误差

这是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。如系统吸热测量公式中没有把散热考虑在内;单摆的周期公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$  的成立条件是摆角趋于零,这在实际中是达不到的;用伏安法测电阻时忽略了电表内阻的影响等。

###### (3) 环境误差

当周围环境的影响量(例如温度、湿度、气压、电磁场和电源频率等)发生变化时,也可能引起测量误差的变化。如果这种变化是有一定规律性的,则也属于系统误差。例如,标准电池随环境温度变化是有规律的,对这种系统误差可以利用其温度修正公式进行修正。

###### (4) 个人误差

这是由于实验者本人生理或心理特点所带来的误差。例如用停表计时时,常有人总是过早(或总是过迟)按表。

##### 2. 随机误差(又称偶然误差)

在测量时,即使排除了产生系统误差的因素,在相同条件下多次重复测量同一物理量时,各次测量值都会有些差异,误差的大小和正负随机变化,这种误差称为随机误差。

随机误差产生的原因是由于实验过程中存在着某些不可预料或未被掌握规律而不能控制的偶然因素。例如,电磁场的微变、环境热流的起伏、对流空气的扰动、大地的微小振动、测量者感觉器官的生理变化等,都是属于这类的影响因素。

进行单次测量时,随机误差是没有任何规律的,既不可预测,也无法控制。但是,对于多次测量来说,随机误差的出现和分布服从一定的统计规律。

系统误差与随机误差产生的原因不同,误差的性质不同,处理的方法也不同。前者是非随机量,处理方法针对具体实验情况来确定;后者是随机量,在处理上有一套完整的统计方法。

##### 3. 粗大误差

在测量过程中,除上述两种性质的误差外,还可能发生读数、记录上的错误,仪器损坏、操作不当等造成测量上的错误。错误不是误差,它是不允许存在的,错误数据应当剔除。克服错误的方法除端正实验态度、严格实验方法外,可用和另一次测量结果相比较的办法去发现、纠正,或者运用异常数据剔除准则判断出因过失而引入的异常数据,并加以

剔除。

#### 4. 系统误差与随机误差的相互转化

系统误差与随机误差之间没有严格的分界线。误差的性质在一定的条件下可以相互转化。例如，尺子的分度误差，对于制造厂来说，在进行分度时是具有随机性质的，故看做为随机误差，但是某一尺子制造出来之后，对于使用者来说，它的分度误差就是确定的了，因此成为系统误差。又如，加工的长管，管径误差在各处都有确定的值，它是系统误差，但对于该管平均效应来说，管各处的误差有大有小，有正有负，具有随机的性质。

在实际测量中，影响测量结果的因素有时以系统误差为主，有时以随机误差为主，有时两者均不可忽略。由于这两种误差分布所遵从的规律不同，在处理实验数据时两种误差应分别处理，然后再求出总的测量误差。对某些规律比较复杂、难以严格区分的误差可当做随机误差处理。

### 五、精密度、准确度和精确度

对测量结果作总体评定时，应把系统误差和随机误差联系在一起。精密度、准确度和精确度是评价测量结果好坏的三个术语。

(1) 精密度——表示对同一被测量作多次重复测量时，各次测量值之间彼此接近的程度。精密度高，说明重复性好，各自测量误差的分布密集，即随机误差小（但系统误差的大小不明确）。它是反映随机误差大小的术语。

(2) 准确度——表示测量值与真值接近的程度。准确度高，说明测量值接近真值的程度好，即系统误差小。可见，它是反映测量结果系统误差大小的术语。

(3) 精确度——用于综合评定测量结果与真值接近的程度。精确度高，说明精密度和准确度都高，它反映随机误差和系统误差的综合效果。

以打靶为例来比较说明。如图 0-1 所示，靶心为射击目标。

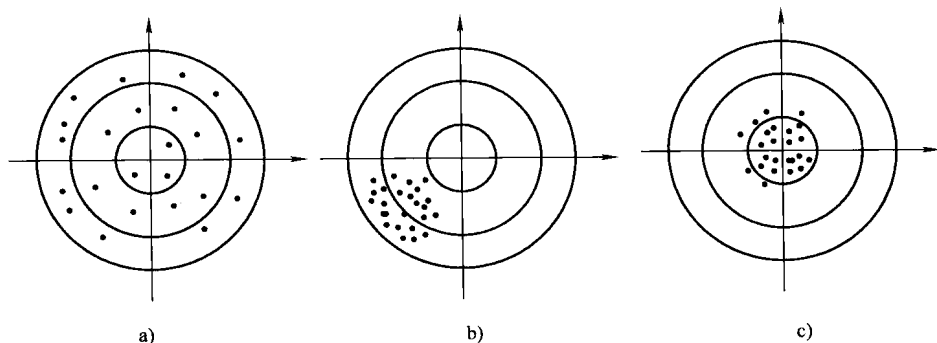


图 0-1

a) 准确度高，精密度低    b) 精密度高，准确度低    c) 精密度、准确度高

### 六、仪器误差限和读数规则

#### 1. 仪器误差限

在物理实验中，常常把由国家技术标准或检定规程规定的计量器具的允许误差或允许基本误差，经过适当简化称为仪器误差限，用  $\Delta_{\text{仪}}$  表示，用以代表常规使用中仪器示值和作用在仪器上的被测量真值之间可能产生的最大误差的绝对值。

表 0-1 给出了常用仪器量具的主要技术要求和仪器误差限（仅供参考，详见仪器说明书）。

表  0-1

| 仪    器 | 量    程                                             | 最小分度值  | 最大允差            |
|--------|----------------------------------------------------|--------|-----------------|
| 木    尺 | 30~50cm                                            | 1mm    | ±1.0mm          |
|        | 60~100cm                                           | 1mm    | ±1.5mm          |
| 钢板尺    | 150mm                                              | 1mm    | ±0.1mm          |
|        | 500mm                                              | 1mm    | ±0.15mm         |
|        | 1000mm                                             | 1mm    | ±0.20mm         |
| 钢卷尺    | 1m                                                 | 1mm    | ±0.8mm          |
|        | 2m                                                 | 1mm    | ±1.2mm          |
| 游标卡尺   | 150mm                                              | 0.02mm | ±0.02mm         |
|        | 300mm                                              | 0.05mm | ±0.05mm         |
| 外径千分尺  | 0~25mm                                             | 0.01mm | ±0.004mm        |
| 普通温度计  | 0~100℃                                             | 1℃     | ±1℃             |
| 精密温度计  | 0~100℃                                             | 0.1℃   | ±0.2℃           |
| 读数显微镜  | —                                                  | 0.01mm | ±0.004mm        |
| 数字式电表  | —                                                  | —      | 最末一位的一个单位       |
| 指针式电表  | 准确度等级 $\alpha$ : 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 |        | ±量程× $\alpha\%$ |

在不能确定仪器误差限时，可取仪器最小分度值的 1/2 作为仪器误差限。

在电学计量中，计算电表的仪器误差时需要考虑电表的准确度等级。根据国家标准（GB）规定，电表的准确度等级分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 级等七个级别，常用  $\alpha$  表示。 $\alpha$  越小，精度越高。

电表的仪器误差定义为

$$\Delta_{\text{仪}} = \text{级别}\% \times \text{量程}$$

2. 读数规则

在物理实验中，使用量具或仪器测量时估读要注意以下一些规则：

（1）对于一般线性刻度的仪器仪表（连续式的），读数应读到最小分度，然后再估读到最小分度值下一位。有时读数的估计位，就取在最小分度位。例如，仪器的最小分度值为 0.5，则 0.1~0.4, 0.5, 0.6~0.9 都是估计的，不必估到下一位；最小分度值为 0.2，则 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 都是估计的，不必估到下一位。对于指针式电表（电压、电流），读到最大允差所在位即可。

例如，一个 0.5 级的电流表，所用量程为 15mA 时，其仪器误差为

$$\Delta_{\text{仪}} = 0.5\% \times 15\text{mA} \approx 0.08\text{mA}$$

读数时，应读到仪器误差这一位，即读到  $\frac{1}{100}\text{mA}$  这一位上。

（2）对于非线性刻度的仪器仪表一般不要求估读，例如欧姆表。

（3）不确定度与分度值非常接近的仪器，进一步估读将无实际意义。例如游标卡尺（属于两点式分布），其游标与主尺的滑动配合存在间隙，测量时由于两侧压力不均匀，可使其

间产生角误差,而游标与主尺的内卡及外卡量爪均不满足阿贝原则(即测量点的工作线应位于线纹尺的延长线上),由此产生的不确定度已可与其分度值相比拟,所以对其无须作进一步估计。

(4) 对于示值产生跳变的仪表(不连续式的),读数时不可能进行估计。例如,数字显示的仪表只能读出其显示的数字,当仪表对稳定的输入信号表现出不稳定的末位显示时,此时可记录一段时间的平均值。机械停表等也属于此类仪器。

(5) 特殊情况下,直读数据的有效数字由仪器的灵敏阈决定。例如,在“灵敏电流计研究”中,测临界电阻时,调节电阻箱“ $\times 10\Omega$ ”仪器才刚有反应,尽管最小步进值为“ $\times 0.1\Omega$ ”,电阻值只记录到“ $\times 10\Omega$ ”。

读数规则的重要性表现在:仪器、仪表读数的末位即是读数误差所在的一位,它将直接关系到对测量不确定度的估计。

## 第二节 测量结果的表示及不确定度的评定

### 一、随机误差的估算

#### 1. 随机误差的分布规律及其特点

随机误差的特点是它的随机性。也就是说,在相同的实验条件下,对同一物理量进行多次重复测量,各测量值有的比真值大,有的比真值小。即随机误差无论在数值的大小或符号上都是不确定的,似乎是偶然的。但若测量次数很多的话,随机误差的出现服从一定的统计规律。根据实验情况不同,随机误差出现的分布规律有正态分布、 $t$ 分布、均匀分布、反正弦分布等。根据教学要求,这里只介绍随机误差的正态分布(又称高斯分布)。

当测量次数足够多时,随机误差服从正态分布的误差分布函数  $f(x)$  为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (0-5)$$

分布函数图形如图 0-2 所示,其中,坐标原点为被测物理量的真值位置,横轴上  $x$  (相当于  $\Delta x$ ) 代表随机误差,  $\sigma$  为标准误差,  $e$  为自然对数的底,误差分布曲线下的面积元  $f(x)dx$  的大小表示误差在  $(x, x+dx)$  区间出现的概率。由于每一次测量,其误差范围总是在  $(-\infty, +\infty)$  之内,则

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1 \quad (0-6)$$

必定成立。因此,式(0-6)称为误差分布函数的归一化条件。

考察这一分布曲线可知,这一误差分布有如下特点:

(1) 对称性——分布曲线关于纵轴对称,表明该随机误差正值与负值出现的机会均等,这就是误差分布的对称性。

(2) 单峰性——分布曲线中间高、两端渐低而接近于横轴,表明误差以较大的概率分布于 0 附近,即绝对值小的误差出现的概率大,而绝对值大的误差出现的概率小。

(3) 有界性——测量的实际误差总是有一定界限而不会无限大,因而经验分布曲线总有

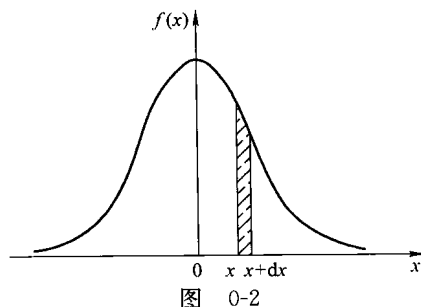


图 0-2

一实际范围,即超过一定数值范围的误差出现的概率趋于零。

(4) 抵偿性——由误差的对称性和有界性可知,这类误差在叠加时有正负抵消的作用。这就是随机误差的抵偿性,这一性质是极为重要的,利用这一性质建立的数据处理法则可有效地减小随机误差的影响,当测量次数  $n \rightarrow \infty$  时,该随机误差的算术平均值趋于零。

## 2. 标准误差 $\sigma$ 的物理意义

由式 (0-5) 可知,  $x=0$  时  $f(0) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ ,  $\sigma$  小时  $f(0)$  大, 正态分布曲线的形状取决于  $\sigma$  值的大小。

如图 0-3 所示,  $\sigma$  愈小, 分布曲线愈陡, 说明绝对值小的误差出现的机会多, 测量值的重复性好 (数据比较集中), 测量的精密度高。反之,  $\sigma$  值愈大, 曲线愈平坦, 说明测量值的重复性差, 分散程度大。可见标准误差反映了测量值的离散程度。请注意: 标准误差与各测量值的误差  $\Delta x_i$  有着完全不同的含义,  $\Delta x_i$  是实在的测量误差值, 而  $\sigma$  并不是一个具体的误差值, 它只反映在一定的条件下等精度测量列随机误差的概率分布情况, 只有统计性质的意义, 是一个统计特征值。

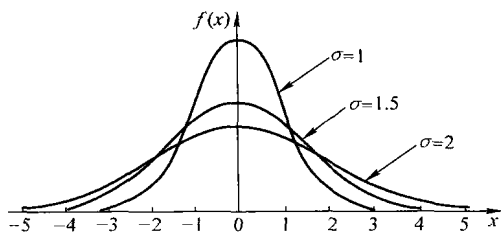


图 0-3

由上述分析可知, 测量值的随机误差出现在  $x$  至  $x+dx$  区域内的概率为  $f(x)dx$ , 则测量值的误差出现在  $[-\sigma, \sigma]$  区域内的概率就是

$$P_1 = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(x)dx = 68.3\% \quad (0-7)$$

这说明任一测量值的误差出现在  $[-\sigma, \sigma]$  范围内的概率为 68.3%。如图 0-4 所示, 这个概率值称为置信概率或置信水平。假如我们对某物理量在相同条件下进行了 1000 次测量, 则测量值的误差可能有 683 次落在  $[-\sigma, \sigma]$  范围内。可见, 标准误差具有统计性质。与上述相仿, 同样可以计算, 在相同条件下对某一物理量进行多次测量, 其任意一次测量值的误差出现在  $[-2\sigma, 2\sigma]$  范围内的概率  $P_2=95.4\%$  及出现在  $[-3\sigma, 3\sigma]$  范围内的概率  $P_3=99.7\%$ 。

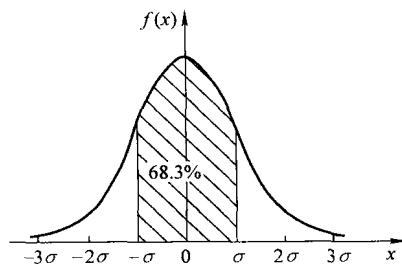


图 0-4

由图 0-3 不难看出, 曲线下的总面积 (即总概率  $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$ ) 不变,  $\sigma$  值小, 曲线变高变窄;  $\sigma$  值大, 曲线较平坦。

由概率  $P_3$  可知, 测量值的误差超出  $[-3\sigma, 3\sigma]$  范围的情况几乎不会出现, 所以我们将  $3\sigma$  称为极限误差。对测量值的误差的绝对值超过  $3\sigma$  的数据, 可以认为这是由于过失引起的异常数据而加以剔除。(但在测量次数较少的情况下, 这种判别方法不可靠, 需要采用另外的判别准则。)

在实际测量中置信概率有不同的取值, 根据国家计量技术规范, 在写出测量结果的表达式时, 要注明它的置信概率。在  $P=0.954$  时, 不必注明  $P$  值; 当  $P$  取 0.683 或 0.997 时要求注明  $P$  值。在物理实验教学中, 我们约定取置信概率  $P=0.683$ 。

### 3. 直接测量量的随机误差估算

#### (1) 以算术平均值代表测量结果

在测量条件不变的情况下，以多次（ $n$  次）测量的算术平均值  $\bar{x}$  作为测量的最佳值来代替真值  $A$ ，即测量结果

$$x = \bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) \quad (0-8)$$

式中， $x_i$  是第  $i$  次测量值。

#### (2) 有限次等精度测量列的标准偏差

在一个测量列中，如果系统误差的影响已被消除，则任一测量值  $x_i$  的随机误差是  $\Delta x_i = x_i - A$ 。由于真值  $A$  无法得到，误差  $\Delta x_i$  也就无法计算。那么，如何评价这一测量列的优劣呢？人们从对正态分布规律的研究中找到了一个适当的参数，它就是式 (0-5) 中的  $\sigma$ ，称为标准误差。标准误差的定义是：对于一个测量列，当测量次数  $n \rightarrow \infty$  时，各次测得值  $x_i$  与真值  $A$  之差的平方和平均值的平方根，称为该测量列中任一值的标准误差，用  $\sigma$  表示。即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - A)^2}{n}} \quad (n \rightarrow \infty) \quad (0-9)$$

在式 (0-9) 中仍然包含真值  $A$ ，且实际测量次数  $n \rightarrow \infty$  也是做不到的，因此实际中常用标准偏差  $S_x$  而不是标准误差  $\sigma$  来表示随机误差。

标准偏差的定义是：对于一个测量列，当测量次数  $n$  有限但很大时，各次测得值  $x_i$  与平均值  $\bar{x}$  之差（即偏差，代替误差  $\Delta x_i = x_i - A$ ）的方和根，称为该测量列中任一值的标准偏差，用  $S_x$  表示。测量列的标准偏差为

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (n \text{ 为有限}) \quad (0-10)$$

上式又称为贝塞尔公式。它表示某次测量值的随机误差在  $-S_x$  到  $+S_x$  之间的概率为 68.3%。由上式可知，当  $n=1$  时， $S_x$  的值是不定的，故测量一次不能用上式进行计算。

#### (3) 算术平均值的标准偏差

一般情况下，在多次测量后，是以算术平均值表达测量结果的，而算术平均值  $\bar{x}$  本身显然也是随机量。下面，我们就来研究算术平均值的标准偏差。

由式 (0-8)，有限次等精度重复测量的算术平均值为

$$x = \bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \cdots + x_n)$$

由于是等精度测量，故对于测量列中的每个测量值而言，它们的标准偏差都应相等，即

$$S_1 = S_2 = \cdots = S_n = S_x \quad (0-11)$$

每个测量值对于总的测量结果只有  $\frac{1}{n}$  的贡献，每个测量值的标准偏差给总的测量结果的

标准偏差的贡献为  $\frac{S_x}{n}$ 。

对多次测量结果的标准偏差采用方和根合成法，则算术平均值的标准偏差为