



高等学校“十一五”精品规划教材

大学物理实验教程

主 编 梅山孩
副主编 倪小静 来娴静



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

04-33/217

2008



高等学校“十一五”精品规划教材

大学物理实验教程

主 编 梅山孩

副主编 倪小静 来娴静



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书按照教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会新近制定的“非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求”，采用多层次模块化课程体系。

本书共6章，包括绪论、实验误差理论与数据处理、基础实验、综合性实验、设计性实验、课题性实验和计算机仿真实验，共41个实验项目，可以按不同需要和培养计划组织教学。本书依据普通本科院校理工科的特点，意在培养重基础、宽口径、高素质、强能力的复合型人才。

本书可作为普通高等工科院校、综合大学及师范类院校非物理专业的大学物理实验基础教材，也可供相关人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验教程/梅山孩主编. —北京：中国水利水电出版社，2008

高等学校“十一五”精品规划教材

ISBN 978 - 7 - 5084 - 5196 - 1

I. 大… II. 梅… III. 物理学—实验—高等学校—教材
IV. 04 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 196283 号

书 名	高等学校“十一五”精品规划教材 大学物理实验教程
作 者	主编 梅山孩 副主编 倪小静 来姝静
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 16.75 印张 397 千字
版 次	2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	29.50 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

纵观物理学发展历史，我们不难发现，物理学研究中的许多重大成果都是由实验得到的。例如，德国科学家伦琴（W. K. Röntgen）在研究真空管放电实验时发现 X 射线，由于这一发现他在世界上第一个获得诺贝尔物理学奖。同样，英籍匈牙利物理学家伽柏（D. Gabor）在 1948 年为提高显微镜的分辨能力，在实验中发明了全息照相技术，因此获得了诺贝尔物理学奖，当今全息照相技术在许多商品的防伪技术上得到广泛的应用。诸如此类的例子不胜枚举。古人云：“天下物理，岂可以意求。”就是说，天下事物的客观规律，不能以自己的主观意志来求真相。通过物理实验不但可以检验理论的正确性，而且还可以发现客观规律，因此，我们可以说，物理学本质上是一门实验的科学。

为了适应我国高等教育大众化教育发展的需要，教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会新近制定了“非物理类理工学科大学物理实验教学基本要求”。在基本要求中，对大学物理实验课程的地位、作用和任务作了明确的阐述，指出物理实验课是高等理工科院校对学生^①进行科学实验基本训练的必修课程，是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。物理实验课程在培养学生严谨治学、活跃创新意识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。

梅山孩等教师结合自己教学中的经验和体会，根据新制定的“非物理类理工学科大学物理实验教学基本要求”，组织编写了《大学物理实验教程》一书。书中通过设置一定数量的基础实验、综合性实验、设计性实验、课题性实验和计算机辅助类实验来实现分层次教学的要求。书中编写了一定数量的综合性实验，在这类实验中，同一个实验涉及多个学科的知识领域，会用到多种实验方法和技术，从而打破了课程单学科编写的体系，体现了当代前沿科学研究中知识面广、学科交叉和相互渗透的特点。通过做这类实验可提高学生^②对实验方法和实验技术的综合运用能力。

我相信，这本《大学物理实验教程》对于学生了解大学物理实验教学内容、实验技能和方法以及提高学生科学实验能力和科学素养一定会有很大帮助。

浙江大学 诸葛向彬

2007 年 11 月 6 日

前言

物理学本质上是一门实验科学。物理实验课程包含丰富的实验思想、方法、手段,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、提高科学素质的重要基础。同时,物理实验课程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应用能力等方面,具有其他实践类课程不可替代的作用。

随着高等教育的大众化,对普通本科院校的教育教学尤其是课程建设提出了更高的要求,编写符合教育部课程体系要求,同时符合学校实际的课程教材显得十分必要。作者在参加历年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会时,看到各高校正如火如荼地开展物理实验课程改革,改革的核心是打破严格的学科体系,建立以培养学生能力为核心的多层次模块化的课程体系,同时吸纳物理学及实验科学的前沿知识。

本书为浙江省高等学校中青年教师资助计划项目。按照教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会新近制定的“非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求”,采用多层次、模块化课程体系,并根据普通本科院校理工科教学的特点,编写本书,意在培养重基础、宽口径、高素质、强能力的复合型人才。

本书模块主要包括基础实验、综合性实验、设计性实验、课题性实验和计算机辅助类实验。基础实验,主要学习基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能和基本测量方法、误差和不确定度以及数据处理的理论与方法等,此类实验为适应各专业的普及性实验。综合性实验,指在同一个实验中涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理等多个知识领域,综合应用多种方法和技术的实验,此类实验的目的是巩固学生在基础性实验阶段的学习成果,开阔学生的眼界和思路,提高学生对实验方法和实验技术的综合运用能力。设计性实验,是指根据给定的实验题目、要求和实验条件,由学生自己设计方案并基本独立完成全过程的实验。课题性实验,是指组织若干个围绕基础物理实验的课题,由学生以个体或团队的形式,以科研方式进行的实验,通过设计性或课题性实验使学生了解科学实验的全过程,逐步掌握科学思想和科学方法,培养学生独立实验的能力和运用所学知识解决给定问题的能力。计算机辅助类实验,是指利用计算机技术采集实验数据,实现

复杂数据的处理和分析,模拟物理实验场景和过程,从而掌握数字化实验基本技术和技能。

本书可作为各类普通本科院校非物理(理工科)专业的大学物理实验用书。

本书由梅山孩任主编。实验一至实验五由倪小静编写;实验二十二至实验二十五由来娴静编写;其余部分由梅山孩编写。杨超云、蔡晓鸥、梁方秋、夏姣真等在实验教材与实验仪器整合方面提出了许多宝贵意见。

本书在编写过程中得到了浙江树人大学毛建明副教授、李立敏副教授和许跃宇副教授的支持,浙江大学诸葛向彬教授、陈守川教授、顾智企副教授、斯公寿高级实验师和钱水明高级实验师等的指导,浙江大学等兄弟院校和仪器厂家的支持,在此表示衷心的感谢。

实验教学的探索是无止境的长期任务,书中的新方法、新观点难免有不妥之处,恳请同行及广大读者提出宝贵意见。

作者

2007年12月

目 录

序

前言

绪论	1
第一章 实验误差理论与数据处理	4
第一节 测量和误差	4
第二节 测量结果的评定和不确定度	8
第三节 有效数字及其运算	14
第四节 实验数据处理	16
练习题	26
第二章 基础实验	28
实验一 牛顿第二定律的研究	29
实验二 动量和机械能守恒定律研究	34
实验三 金属材料杨氏模量的测定	38
实验四 用扭摆法测定物体转动惯量	44
实验五 均匀弦振动的研究	49
实验六 非良导体热导率的测量	53
实验七 空气比热容比的测定	57
实验八 电源电动势、内阻和输出功率的研究	61
实验九 惠斯通电桥测电阻	64
实验十 用直流双臂电桥测低值电阻	70
实验十一 示波器的调整和应用	75
实验十二 电表改装与校准	81
实验十三 RLC 电路的稳态过程研究	89
实验十四 霍尔效应法测定通电螺线管轴向磁感应强度分布	97
实验十五 薄透镜焦距的测定	104
实验十六 分光计的调整和使用	110
实验十七 光的干涉——牛顿环	117
实验十八 迈克耳逊干涉仪	125
实验十九 光栅衍射测量	130
实验二十 偏振现象的观察和分析	135

第三章 综合性实验	139
实验一 密立根油滴实验	140
实验二 弗兰克—赫兹实验	144
实验三 光电效应法测定普朗克常数	149
实验四 声速的测定	156
实验五 核磁共振	165
实验六 音频信号光纤传输技术实验	174
实验七 全息照相	180
第四章 设计性实验	186
实验一 固体密度的测定	187
实验二 折射率的测量	188
实验三 金属电阻的温度系数测量	189
实验四 金属箔式应变片性能研究: 单臂、半桥、全桥比较	190
实验五 测定伏安特性曲线	192
实验六 非线性电阻特性研究	193
实验七 半导体温度计的设计	194
第五章 课题性实验	195
实验一 真空获得与真空镀膜	196
实验二 微波等离子体化学气相沉积制备金刚石薄膜	206
实验三 微波等离子体刻蚀加工实验	212
实验四 金刚石的形核	216
实验五 超导体转变温度的测量	219
第六章 计算机仿真实验	227
仿真实验的基本操作方法	228
实验一 力热学基本物理量及常用仪器介绍	238
实验二 卡文迪许扭秤法测量万有引力常数	241
附录	249
附录一 中华人民共和国法定计量单位	249
附录二 常用物理数据	251
附录三 常用电气测量指示仪表和附件的符号	256
参考文献	259

绪 论

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学科。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。

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。

物理实验在创新能力、思维能力的培养方面有着重要的、不可替代的作用。物理实验通过基本实验的设计思想方法、技能以及基本的科学思维方法的教学来实现对人才科学素质的培养。

一、课程的地位、作用和任务

“大学物理实验”课程是对高等学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程，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，是理工科类专业对学生进行科学实验训练的重要基础。

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、提高科学素质的重要基础。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。

“大学物理实验”课程的具体任务是：

(1) 培养基本科学实验技能，提高科学实验基本素质，初步掌握实验科学思想和方法；培养科学思维和创新意识，掌握实验研究的基本方法，提高分析能力和创新能力。

(2) 通过对实验现象的观察、分析及对物理量的测量，加深对物理原理的理解。

(3) 通过物理实验培养和提高科学实验能力：①通过阅读实验教材，查找资料，做好实验前期的准备；②借助教材或说明书，正确使用常用仪器、仪表的能力；③借助理论对物理现象进行初步分析判断的能力；④会处理实验数据，绘制曲线，撰写实验报告；⑤能够完成简单的具有设计性内容的实验。

(4) 通过物理实验提高科学素养，培养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。

(5) 培养遵守纪律，团结协作，爱护公共财产的优良品德。

二、教学内容的基本要求

大学物理实验包括普通物理实验（力学、热学、电学、光学实验）和近代物理实验，具体的教学内容基本要求如下：

（1）了解一些物理实验史料和在工程技术中的应用知识，深入体会科学实验的重要性，明确物理实验课程的地位、作用和任务。

（2）自行完成预习实验及按要求撰写实验报告等程序。

（3）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，还应包括使用计算机通用软件处理实验数据的基本方法。

（4）掌握基本物理量的测量方法。

（5）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的广泛应用的其他方法。

（6）掌握实验室常用仪器的性能，并能够正确使用。

（7）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。

（8）通过一定数量的近代物理实验、综合性实验及设计性实验，理解近代物理概念、物理实验技术的应用，提高综合实验能力。

三、大学物理实验课的基本环节

1. 实验前要做好预习

预习时，主要阅读实验教材，了解实验目的，搞清楚实验内容，要测量什么量，使用什么方法，实验的理论依据（原理）是什么，使用什么仪器，其仪器性能是什么，如何使用，操作要点及注意事项等，在此基础上，回答好思考题，草拟出操作步骤，设计好数据记录表格，准备好自备的物品。

2. 课堂认真进行实验

实验课一般先由指导教师作重点讲解，交待有关注意事项，扼要、简单地讲授内容，具有指导性和启发性，学生要结合自己的预习逐一领会，特别要注意那些在操作中容易引起失误的地方。

在实验进程中，首先是布置、安装和调试仪器。要思考桌面上若干个仪器是否布置合理、读数是否方便，做到操作有序，使仪器设备尽量能为我所用。为了使仪器装置达到最佳工作状态，必须细致、耐心地进行调试。这样很可能要花较多时间，切忌急躁。要合理选择仪器的量程，如果在调试中遇到了困难而自己不能解决时，可以请教指导老师。

调试准备就绪后，开始进行测量。实验时一定要先观察实验现象，通过观察对被验证的定律或被测的物理量有个定性的了解，然后再进行精确的测量。测量的原始数据要整齐地记录在自己设计的表格中，读数一定要认真仔细，实验原始数据的优劣，决定着实验的

成败。记录的数据一定要标明单位。不要忘记记录有关的环境条件，如温度、压强等。如果两个学生同时做一个实验，既要分工又要协作，各自记录实验数据，共同完成实验任务。

在测量过程中要尽量保持实验条件不变，要注意操作姿势，身体不要靠着桌子，不要使仪器发生移动或受到振动。如果遇到仪器装置出现故障，学生应力求自己动手解决，或留意观看教师是怎样分析判断仪器的毛病，怎样修复仪器的（可能当场修复的仪器）。测量完数据后，记录的数据要经指导教师审阅签字，然后再进行数据处理。如果发现错误数据时，要重新进行测量。

3. 写实验报告

实验报告是对实验工作的总结，是交流实验经验、推广实验成果的媒介。学会编写实验报告是培养实验能力的一个方面。写实验报告要用简明的形式将实验结果完整、准确地表达出来，要求文字通顺、字迹端正、图表规范、结果正确、讨论认真。实验报告用学校统一印制的“实验报告纸”来书写。

实验报告通常包括以下内容：

- (1) 实验名称。表示做什么实验。
- (2) 实验目的。说明为什么做这个实验，做该实验要达到什么目的。
- (3) 实验仪器。列出主要仪器的名称、型号、规格、精度等。
- (4) 实验原理。阐明实验的理论依据，写出待测量计算公式的简要推导过程，画出有关的图（原理图或装置图），如电路图、光路图等。
- (5) 数据记录。实验中所测得的原始数据要尽可能用表格的形式列出，正确表示有效数字和单位。
- (6) 数据处理。根据实验目的对实验结果进行计算或作图表示，并对测量结果进行评定，计算不确定度，计算要写出主要的计算内容。
- (7) 实验结果。扼要写出实验结论，要体现出测量数据、误差和单位。
- (8) 问题讨论。讨论实验中观察到的异常现象及其可能的解释，分析实验误差的主要来源，对实验仪器的选择和实验方法的改进提出建议，简述自己做实验的心得体会，回答实验思考问题。

为了保证实验课程的正常进行，现在对实验报告提出以下三点要求：

- (1) 课前要求预习实验内容，明确实验目的，了解实验原理，弄清实验步骤，初步了解仪器的使用方法，画好实验数据记录表格。未做好预习者不得动手做实验。
- (2) 在测量时，应如实、即时做好实验数据记录（数据记录要整洁，字迹清楚，避免错记），不可事后凭回忆“追记”数据，更不可为拼凑数据而涂改实验数据记录。
- (3) 实验报告要认真按时完成。在做物理实验时，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。实验的目的和任务不仅是学习知识，更重要的是要将知识转化为能力！

第一章 实验误差理论与数据处理

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物理量。而对事物定量地描述又离不开数学方法和进行实验数据的处理，因此，误差分析和数据处理是物理实验课的基础。本章将从测量及误差的定义开始，逐步介绍有关误差和实验数据处理的方法和基本知识。

第一节 测量和误差

对物理量进行测量，是物理实验中极其重要的一个组成部分。对某些物理量的大小进行测定，将被测量与被定为标准的同一物理量的单位量进行比较并确定其比值的过程，称为测量。

一、直接测量与间接测量

按照测量结果获得的方法不同，可将测量分为直接测量和间接测量两类。按照测量条件不同，又可分为等精度测量和不等精度测量。直接测量就是把待测量与标准量直接比较得出结果，如用米尺测长度，用天平测物体的质量，用安培表测电流强度等；间接测量是指被测量不能用直接测量的方法得到，而是利用若干个直接测量值通过一定的函数关系计算出被测量的数值的过程，如用单摆测重力加速度 g 时先测出摆长和周期 T 的量值，然后由 $g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$ 求出 g 的量值。

二、测量误差

无论哪种测量，其测量值与被测量真值之间总是存在着一定的差异。我们将测量值与被测量真值之差称为测量误差，即：

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值} \quad (1-1-1)$$

它不但反映了测量值偏离真值的大小，而且还反映了测量值是比真值大还是比真值小。由于是与真值相比较，故又称绝对误差，简称误差。

被测量的真值是指在一定时间、一定状态下，被测量客观存在的真实大小。它是个理想的概念，包含理论真值、公认真值、计量学约定真值和标准器相对真值。但在多数情况下，特别是在研究性的实验中，被测量的真值往往都是未知的，实验的目的就是采用科学的方法测得其“真值”，探索其规律。

误差按其性质可分为系统误差和随机误差。

1. 系统误差

系统误差是指在一定条件下多次测量的结果总是向一个方向偏离，按一定规律变化。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。产生系统误差的原因如下：

(1) 器具误差与调整误差：由于测量器具本身具有的误差所引起的，以及由于测量前未能将测量器具或被测对象调整到正确位置或状态所引起的误差。

(2) 理论误差与方法误差：由于测量理论的近似或由于测量方法的不完善所引起的误差。例如，伏安法测电阻没考虑电表的内阻，如图 1-1-1 所示，外接时：

$$R_{\text{测}} = \frac{U_{\text{测}}}{I_{\text{测}}} = \frac{U_x}{I_V + I_x} < \frac{U_x}{I_x} = R_x \quad (1-1-2)$$

即测量值从理论上推导就肯定比真实值小。同理，内接时同学可自行推导得出：测量值理论上比真实值要大。

(3) 环境误差：由于实际环境条件与规定条件不一致所引起的误差。

(4) 人员误差：由于测量人员主观因素和操作技术所引起的误差。

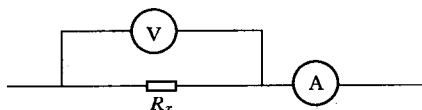


图 1-1-1 电表内阻

产生系统误差的原因可能不止一个，一般应找出影响的主要因素，有针对性地消除或减小系统误差。以下介绍几种常用的方法：

(1) 检定修正法：将仪器、量具送计量部门检验取得修正值，以便对某一物理量测量后进行修正的一种方法。

(2) 替代法：测量装置测定待测量后，在测量条件不变的情况下，用一个已知标准量替换被测量来减小系统误差的一种方法。如消除天平的两臂不等对待测量的影响可用此办法。

(3) 异号法：对实验时在两次测量中出现符号相反的误差，采取平均值后消除的一种方法。例如在外界磁场作用下，仪表读数会产生一个附加误差，若将仪表转动 180° 再进行一次测量，外磁场将对读数产生相反的影响，引起负的附加误差。两次测量结果平均，正负误差可以抵消，从中可以减小系统误差。

2. 随机误差

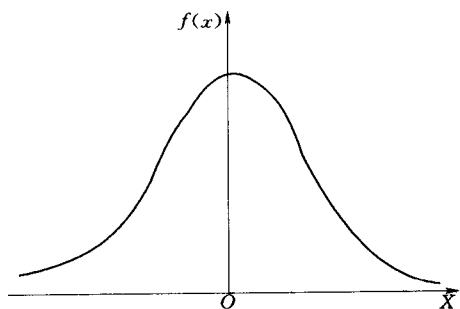


图 1-1-2 “正态分布”图

在实际测量条件下，多次测量同一量时，误差的绝对值符号的变化，时大时小、时正时负，以不可预定方式变化着的误差称为随机误差，也叫偶然误差。当测量次数很多时，随机误差就显示出明显的规律性。理论和实验都表明，大量的随机误差均服从“正态分布”规律（图 1-1-2），有如下特点：

(1) 绝对值相等的正负误差出现的几率相等。

(2) 绝对值小的误差出现的几率比绝对值大的误差出现的几率大。

(3) 随机误差的算术平均值随测量次数的增加而减小, 当测量次数趋于无穷时, 随机误差趋于零。随机误差存在一“最大误差”, 即误差的绝对值不超过某一限度。由于随机误差存在上述性质, 可以用增加测量次数的方法来减小随机误差。当测量次数足够多时, 测量值的随机误差趋近于零, 测量值的算术平均值就趋近于真值。

引起随机误差的原因很多: ①与仪器精密度和观察者感官灵敏度有关, 如仪器显示数值的估计读数位偏大和偏小; ②仪器调节平衡时, 平衡点确定不准; ③测量环境扰动变化; ④其他不能预测不能控制的因素, 如空间电磁场的干扰, 电源电压波动引起测量的变化等。

此外, 由于测量者过失, 如实验方法不合理、用错仪器、操作不当、读错数值或记错数据等引起的误差, 是一种人为的过失误差, 不属于测量误差, 只要测量者采用严肃认真的态度, 过失误差是可以避免的。

三、精密度、准确度和精度

反映测量结果与真实值接近程度的量, 称为精度 (亦称精确度), 它反映测量中所有系统误差和偶然误差综合的影响程度。精度与误差大小相对应, 测量的精度越高, 其测量误差就越小。精度应包括精密度和准确度两层含义。

(1) 精密度。测量中所测得数值重现性的程度, 称为精密度。它反映偶然误差的影响程度, 精密度高就表示偶然误差小。

(2) 准确度。测量值与真值的偏移程度, 称为准确度。它反映系统误差的影响精度, 准确度高就表示系统误差小。

在一组测量中, 精密度高的准确度不一定高, 准确度高的精密度也不一定高, 但精度高, 则精密度和准确度都高。

为了说明精密度和准确度的区别, 可用下述打靶子例子来说明。如图 1-1-3 所示。

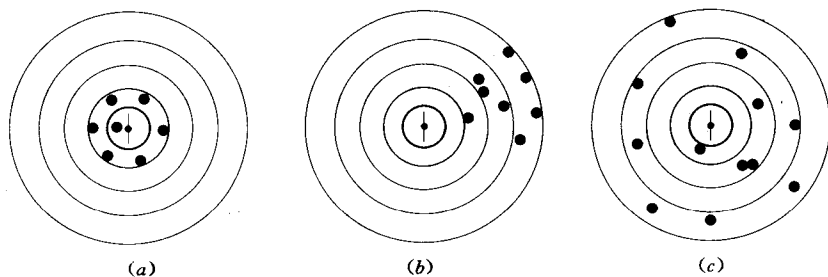


图 1-1-3 精密度和准确度的关系

图 1-1-3 (a) 中表示精密度和准确度都很好, 则精度高; 图 1-1-3 (b) 表示精密很好, 但准确度却不高; 图 1-1-3 (c) 表示精密度与准确度都不好。在实际测量中没有像靶心那样明确的真值, 而是设法去测定这个未知的真值。

学生在实验过程中, 往往满足于实验数据的重现性, 而忽略了数据测量值的准确程度。绝对真值是不可知的, 人们只能订出一些国际标准作为测量仪表准确性的参考标准。

随着人类认识运动的推移和发展,可以逐步逼近绝对真值。

四、直接测量误差估算和测量结果的表达

假设在实验中已将系统误差消减到可以忽略的程度,通过等精度测量(即同一测量者,在同一条件下,用相同的仪器,对被测量进行多次重复测量),由于各种因素的微小变动所引起的测量值微小的不可预测的差异,得到一系列测量值,我们所关心的是最接近真值的值(称真值的最佳估计值,在计量学上称为测量值的测量结果期望估计值)。

1. 真值的最佳估计值(近真值)——算术平均值、残差(偏差)

随机误差有一个极其重要的特性——抵偿性,即在一列等精度测量中,由于每次测量值的误差时大时小、时正时负,所以误差的算术平均值随着测量次数的无限增加而趋于0。根据这一特性,我们可以求得真值的最佳估计值——近真值。

设一系列等精度测量值: $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则该列测量值的算术平均值为:

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

而各次测量的(绝对)误差为:

$$\Delta X_i = x_i - X_0 \quad (1-1-4)$$

式中: X_0 为被测量的真值; x_i 为第 i 次测量值。

对 n 次测量的(绝对)误差求和得:

$$\sum_{i=1}^n \Delta X_i = \sum_{i=1}^n x_i - nX_0 \quad (1-1-5)$$

等式两边各除以 n , 得:

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - X_0 = \bar{X} - X_0 \quad (1-1-6)$$

当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 由于随机误差具有抵偿性, 所以有 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i \rightarrow 0$, 由式(1-1-6)得:

$$\bar{X} \rightarrow X_0$$

因此在已消除系统误差的前提下, 可认为多次测量的平均值 $\bar{X}$ 是真值的最佳估计值。则各次测量值与 $\bar{X}$ 的差称为残余误差, 简称残差, 又称偏差, 近似为各测量值与真值的误差。在一般的讨论中, 我们不去严格区分“偏差”和“误差”。

在物理实验中, 多次测量的误差常用算术平均绝对偏差和标准偏差来表示。

2. 算术平均绝对偏差

在多次测量中, 每次测量值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 的偏差的绝对值为:

$$\Delta x_1 = |x_1 - \bar{x}|, \Delta x_2 = |x_2 - \bar{x}|, \dots, \Delta x_n = |x_n - \bar{x}|$$

则算术平均绝对偏差定义为:

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} (|\Delta x_1| + |\Delta x_2| + \dots + |\Delta x_n|) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i| \quad (1-1-7)$$

测量结果可表示为:

$$x = \bar{x} \pm \overline{\Delta x} \quad (1-1-8)$$

式 (1-1-8) 称为测量结果的算术平均绝对偏差表示方式。它表明被测量 x 的最佳估值是 $\bar{x}$, $(\bar{x} - \Delta\bar{x}) \sim (\bar{x} + \Delta\bar{x})$ 区间包含真值的可能性最大。这是一种粗略的估算。

3. 标准偏差 (又称方均根偏差)

偶然误差最通常的表示方式为标准偏差。当测量次数足够多时, 标准偏差定义为:

$$S_x = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{贝塞尔公式}) \quad (1-1-9)$$

其意义表示某次测量值的随机误差在 $-\sigma_x \sim +\sigma_x$ 之间的概率为 68.3%。

4. 算术平均值的标准偏差

当测量次数 n 有限, 其算术平均值的标准偏差为:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-1-10)$$

其意义是测量平均值的标准偏差在 $-\sigma_{\bar{x}} \sim +\sigma_{\bar{x}}$ 之间的概率为 68.3%。或者说, 待测量的真值在 $(\bar{x} - \sigma_{\bar{x}}) \sim (\bar{x} + \sigma_{\bar{x}})$ 范围内的概率为 68.3%。因此 $\sigma_{\bar{x}}$ 反映了平均值接近真值的程度。

标准偏差 σ_x 小表示测量值密集, 即测量的精密度高; 标准偏差 σ_x 大表示测量值分散, 即测量的精密度低。估计随机误差还有用算术平均误差、 $2\sigma_x$ 、 $3\sigma_x$ 等其他方法来表示的。标准误差不是一个具体的误差, σ 的大小只说明在一定条件下等精度测量集合所属的每一个观测值对其算术平均值的分散程度, σ 的值越小则说明每一次测量值对其算术平均值分散度就小, 测量的精度就高, 反之精度就低。

5. 相对误差

衡量某一测量值的准确程度, 一般用相对误差来表示。绝对误差 Δx 与被测量的实际值 x_0 的百分比值称为实际相对误差。记为:

$$E_x = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-1-11)$$

第二节 测量结果的评定和不确定度

测量的目的是不但要测量待测物理量的近似值, 而且要对近似真实值的可靠性做出评定 (即指出误差范围), 这就要求必须掌握不确定度的有关概念。下面将结合对测量结果的评定对不确定度的概念、分类、合成等问题进行讨论。

一、不确定度的含义

1. 不确定度

理想的测量是获得被测量在测量条件下的真值, 但是实际在测量时, 由于实验方法和计量器具的不完善, 测量环境不理想、不稳定, 实验者在操作上和读取数值时不十分准确等原因, 都将使测量值偏离真值, 因而测得值不能准确表达真值。在表达被测量的测量结

果时, 因为表达的是被测量的近似值, 所以应同时说明对它的可靠性评价, 即给出此测量质量的指标, 测量不确定度就是测量质量的指标。

不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度, 是表征对被测量值的真值所处的量值范围的评定。它是测量结果所携带的一个必要的参数, 以表征待测量值的分散性、准确性和可靠程度。

测量值不等于真值, 可以设想真值就在测量值附近的一个量值范围内, 测量不确定度就是评定作为测量质量指标的此量值范围。设测量值为 x , 其测量不确定度为 u , 则真值可能在量值范围 $(x-u, x+u)$ 之中, 显然此量值范围越窄, 即测量不确定度越小, 用测量值表示真值的可靠性就越高。

2. 标准不确定度

对测量不确定度的评定, 常以估计标准偏差去表示大小, 这时称其为标准不确定度。

二、测量结果的表示和合成不确定度

在做物理实验时, 要求表示出测量的最终结果。在这个结果中既要包含待测量的近似真实值 $\bar{x}$, 又要包含测量结果的不确定度 σ , 还要反映出物理量的单位。因此, 要写成物理含义深刻的标准表达形式, 即:

$$x = \bar{x} \pm \sigma \quad (\text{单位}) \quad (1-2-1)$$

式中: x 为待测量; $\bar{x}$ 为测量的近似真实值; σ 为合成不确定度, 一般保留一位有效数字。

这种表达形式反应了三个基本要素: 测量值、合成不确定度和单位。

在测量结果的标准表达式中, 给出了一个范围 $(\bar{x}-\sigma) \sim (\bar{x}+\sigma)$, 它表示待测量的真值在 $(\bar{x}-\sigma) \sim (\bar{x}+\sigma)$ 范围之间的概率为 68.3%, 但真值不一定就会落在 $(\bar{x}-\sigma) \sim (\bar{x}+\sigma)$ 之间。

在上述的标准式中, 近似真实值、合成不确定度、单位三个要素缺一不可, 否则就不能全面表达测量结果。同时, 近似真实值 $\bar{x}$ 的末尾数应该与不确定度的所在位数对齐, 近似真实值 $\bar{x}$ 与不确定度 σ 的数量级、单位要相同。

在不确定度的合成问题中, 主要是从系统误差和随机误差等方面进行综合考虑, 提出统计不确定度和非统计不确定度的概念。合成不确定度 σ 是由不确定度的两类分量 (A 类和 B 类) 求“方和根”计算而得。为使问题简化, 本书只讨论简单情况下 (即 A 类、B 类分量保持各自独立变化, 互不相关) 的合成不确定度。

A 类不确定度 (统计不确定度) 用 S_i 表示, B 类不确定度 (非统计不确定度) 用 σ_B 表示, 合成不确定度为:

$$\sigma = \sqrt{S_i^2 + \sigma_B^2} \quad (1-2-2)$$

三、合成不确定度的两类分量

计算不确定度是将可修正的系统误差修正后, 将各种来源的误差按计算方法分为两类, 即用统计方法计算的不确定度 (A 类) 和非统计方法计算的不确定度 (B 类)。

1. A 类不确定度

A 类不确定度即统计不确定度, 是指可以采用统计方法 (即具有随机误差性质) 计算的不确定度, 如测量读数具有分散性、测量时温度波动影响等。这类统计不确定度通常认