

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

# 大学物理实验

主编 张海鷗 邵明辉 崔晓军

高等教育出版社

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

# 大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主编 张海鷗 邵明辉 崔晓军

编委 (按姓氏笔画排序)

刘金祥	孙平	李欣	张海鷗
张铭扬	陈小艺	陈涛	陈新莲
邵明辉	高丽	高若平	崔晓军
薛曦	魏平		

高等教育出版社·北京

## 内容提要

本书是根据教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),结合本校的教学经验编写的实验教材。全书包含30个实验,涉及力学、电磁学、光学、近代物理等方面的实验内容。本教材编写以实验方法为主线,改变了过去“分层次”的实验项目划分体系,并借助“互联网+”实现了教材的立体化。

本书可作为高等学校理工科的物理实验教材,也可供科技工作者参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 张海鹏, 邵明辉, 崔晓军主编. --  
北京: 高等教育出版社, 2015. 8

ISBN 978-7-04-043601-3

I. ①大… II. ①张… ②邵… ③崔… 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 (2015) 第 171590 号

策划编辑 缪可可	责任编辑 缪可可	封面设计 杨立新	版式设计 杜微言
插图绘制 杜晓丹	责任校对 陈 杨	责任印制 田 甜	

---

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 100120  
印 刷 北京铭传印刷有限公司  
开 本 787 mm×1092 mm 1/16  
印 张 17  
字 数 350 千字  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
版 次 2015年8月第1版  
印 次 2015年8月第1次印刷  
定 价 29.80 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  
物 料 号 43601-00

# 前言

大学物理实验教学的目的与中学阶段的物理实验教学的目的不同的。“大学物理实验”是一门独立的基本课程，它不是“大学物理学”课程的分支或组成部分。虽然物理实验必须以物理学的理论为基础，运用物理学的原理进行实验或研究，但是“大学物理实验”独立于“大学物理学”，它不是以验证物理定律、加强理解物理规律为主要目的，也并非分散的力学、热学、磁学和光学实验的堆积，而是以物理实验的基本技术或基本物理量的测量方法为主线，再贯穿以现代误差理论和现代物理实验仪器设备、器件的原理及使用方法，构建成一个完整的但又不断发展的课程体系框架。

物理实验课是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程，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课程。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。

其教学目的如下：

(1) 掌握基本物理量的各种测量方法，学会分析测量的误差，学会基本的实验数据处理方法，能正确地表达测量结果，并对测量结果进行正确的评价（测量不确定度）。

(2) 掌握物理实验的基本知识、基本技能，常用实验仪器设备、器件的原理及使用方法，并能正确运用物理学理论指导实验。

(3) 培养、提高基本实验能力，并进一步培养创新能力。基本实验能力是指能顺利完成某种实验活动（科研实验或教学实验）的各种相关能力的总和，主要包括观察思维能力、使用仪器能力、故障分析能力、数据处理能力、报告写作能力、初步实验设计能力等。

(4) 培养从事科学实验的素质。它包括理论联系实际和实事求是

是的科学作风, 严肃认真的工作态度, 吃苦耐劳、勇于创新的精神, 遵守操作规程、爱护公共财物的优良品德以及团结协作、共同探索的精神。

基于以上目的, 我们在编写教材时, 除了强调基本概念、基本方法、基本技能、仪器使用等内容以外, 主要做了以下几点尝试:

(1) 以实验方法为主线, 组织教材内容。对实验模块进行重新组合, 传统大学物理实验的模块是按照“力、热、电、光、原”等知识点来进行划分的, 本教材则是按实验项目在实验方法上的关联来划定模块的。

例如, 原来是将迈克耳孙实验与等厚干涉计量实验作为一个模块, 突出的是光学干涉这一知识点; 改革后将迈克耳孙实验与金属线膨胀系数测量实验进行搭配, 重点突出对长度微小改变量的测量方法, 实现了跨知识点融合。

(2) 改变过去“分层次”的实验项目划分体系。大学物理实验的项目数量相对较多, 每个实验项目分配的学时较少, 但是各实验项目并不是完全孤立的。很多实验项目从原理到测量手段都有密切联系, 这类实验项目完全可以进行合并、扩展, 甚至开发出新的实验内容, 增加项目的综合性、设计性和探究性, 而不是仅仅停留在原有仪器的单一功能上。

在实验项目编排中, 本书没有采用传统的办法将实验划分成基础、综合、设计等类别, 而是根据各项目的内在联系, 同时考虑实验方法, 将涉及的 30 个实验项目划分为“部分常见仪器使用”“示波器及其应用”“干涉测量法”“量子化的概念”等十余个小单元。每个小单元内的实验项目相互联系, 变单一为综合, 突出创新和科学精神的培养。

在实践中, 我们一般每个单元授课 5~10 学时, 分 1~2 次上完。例如, 将示波器的使用实验(基本技能实验)和声速测定实验(综合性实验)进行搭配, 使学生在学完示波器的使用方法后能够直接用于一个综合性实验的测量, 从而做到学以致用, 加深其对基本技能的掌握。再例如, 将基本力学量测量实验(原属基本技能实验)和黏度测定实验(原属设计性实验)进行搭配, 让学生在掌握基本测量工具的使用和误差分析的基础上, 直接将该内容用于设计性实验中对误差匹配问题的分析与设计, 锻炼其基于误差理论来分析问题的能力。

(3) 广泛使用流程图, 在实验原理、实验步骤中增设问题, 引导学生思辨。每个实验项目后, 增加附录部分, 包含难点详解、知识拓展等, 为学生自主学习创造条件。

在大学物理实验教学中引入科学论, 哪怕是看上去最简单的实

验，也要启发和激励学生进行思辨和创新。科学探究是指学生构造知识、形成科学观念、领悟科学研究方法的各种行动。在大学实验教学观念中融入科学论，使学生从被动的“参加者”和“操作者”变为主动的“实践者”和“探索者”，在实验教学中突出物理思想、技术方法和实验拓展的训练。大学物理实验要像从事科学研究一样，提出问题、设计方案、控制变量、分析结果、讨论总结。

(4) 将部分高新技术引入到大学物理实验教学当中。随着科学技术的发展，知识更新越来越快，学科交叉越来越多。原本没有联系的学科可能通过新的发现而交织在一起，原本没有联系的知识可能通过学科发展而联系在一起。因此，在大学物理实验中及时补充新知识及其在传统实验中的应用，可给实验项目添加活力，提高学生对实验的兴趣和创新动力，并给学生指出一种用新知识解决老问题的创新方法。

(5) 自主开发微课视频、仿真软件等网络资源，借助“互联网+”，实现教学的立体化。

以微课的形式，重点说明某一知识点或操作难点，便于学生预习、复习，可以减少教师在课堂上对实验操作步骤的讲解，有利于教学模式的转变。仿真软件可以使学生在课前对实验仪器的结构和操作有更深入的理解。值得一提的是，本书使用的仿真软件和实物仪器的结构是一一对应的，弥补了一些仿真软件过于抽象的缺点，有利于学生预习使用。本书的微课视频和仿真软件都具有原创性，是广大教师和多届学生共同努力的结果，在此表示深深的感谢。

总之，实验课堂不是教师对学生进行知识的灌输，而是在教师指导下，使得学生既是实验的完成者，又是实验的设计者、仪器设备的组织者。希望本书的使用能对大学物理实验教学的改革起到良好的推动作用。

本书是由济南大学物理科学与技术学院大学物理教学中心的广大教师集体合作编写而成的，同时得到了学校和学院的大力支持，得到山东省高等学校教学改革立项项目(2012203)资助。由于平时授课任务繁重，很多教师把寒暑假的时间投入到教材的编写中。在此，向历年参编实验讲义的所有教师致敬，感谢他们的无私付出和辛勤劳动！

说明：本教材所涉及的实验报告模板可到大学物理课程中心网站下载。课程中心网站：<http://course.ujn.edu.cn/dxwl.html>。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请批评指正。

编者

2015年3月

# 目录

第一章 绪论 .....	1	实验 9 旋转液体综合实验 .....	101
第一节 开设大学物理实验 课的必要性及意义 .....	1	• 电学基本实验 .....	107
第二节 物理实验课的基本 程序和要求 .....	3	实验 10 模拟法描绘静电场 ...	107
第二章 实验数据处理的基础		实验 11 电表的组装与校准 ...	113
知识 .....	6	实验 12 电桥的使用 (单臂、 双臂) .....	119
第一节 测量与测量误差 .....	6	• 磁场与磁性材料 .....	126
第二节 测量结果的不确定度 ...	9	实验 13 电子束荷质比的 测定 .....	126
第三节 有效数字及其运算 .....	13	实验 14 各向异性磁阻传感器 与磁场测量 .....	139
第四节 数据处理的几种常用 方法 .....	17	实验 15 铁磁材料居里点的 测定 .....	147
第五节 计算机处理实验数据 简介 .....	21	• 杨氏模量的测量 .....	153
第六节 实验设计和方案制定 的注意事项 .....	35	实验 16 拉伸法测杨氏模量 ...	153
习题 .....	38	实验 17 微弯法测杨氏模量 ...	158
第三章 大学物理实验		• 干涉测量法 .....	163
项目 .....	40	实验 18 等厚干涉法长度 计量 .....	163
• 部分常见仪器的使用 .....	40	实验 19 迈克耳孙干涉仪的 调节与使用 .....	169
实验 1 长度测量基本仪器的 使用 .....	40	实验 20 干涉法测线膨胀 系数 .....	177
实验 2 液体黏度的测定 .....	45	• 分光计的使用 .....	183
• 示波器及其应用 .....	50	实验 21 分光计的使用与棱镜 介质色散关系的 研究 .....	183
实验 3 双踪示波器的使用 .....	50	实验 22 光栅常量测量 .....	196
实验 4 声速的测定 .....	63	• 旋光物质 .....	203
• 质点、刚体力学实验 .....	71	实验 23 液体旋光物质的 质量浓度测量 .....	203
实验 5 动力学综合实验 .....	71	• 光电转换 .....	211
实验 6 扭摆法测转动惯量 .....	79		
实验 7 受迫振动的研究 .....	85		
• 流体的研究 .....	95		
实验 8 液体表面张力系数的 测量 .....	95		

实验 24	光敏电阻特性研究	…	211	强度分布测定	…	236	
实验 25	硅光电池特性的 研究	…	218	• 量子化的概念	…	242	
• 霍尔器件	…	…	227	实验 28	密立根油滴实验	…	242
实验 26	霍尔效应实验	…	227	实验 29	弗兰克-赫兹实验	…	250
实验 27	螺线管轴向磁感应			实验 30	光电效应与普朗克 常量测定	…	256



# 第一章

## 绪论

### 第一节 开设大学物理实验课的必要性 with 意义

#### 一、学科交叉成为当今科学研究的热点和主流

近代科学发展特别是科学上的重大发现和国计民生中的重大社会问题的解决，常常涉及不同学科间相互交叉和相互渗透，如物理学和化学的交叉形成了物理化学和化学物理学、化学与生物学的交叉形成了生物化学和化学生物学、物理学和生物学交叉形成了生物物理学等。现代科学技术的突破往往发生于学科交叉的前沿领域，下面举几个例子。

信息技术是由物理学、电子学和计算机科学等学科交叉形成的。而信息技术中最重要的半导体技术却是由固体物理学、微电子学与精细加工技术等学科交叉形成的。信息技术主要是指利用电子计算机和现代通信手段获取、传递、存储、处理、显示和分配信息等的技术。信息技术主要包括传感技术、通信技术、计算机技术、控制技术和显示技术等。

纳米技术是材料科学、电子学、物理学、化学、生命科学等学科的交叉，它的基本内涵是以纳米颗粒、纳米线、纳米管、纳米薄膜为基本单元，在一维、二维和三维空间组装排列成具有独特介观性质的纳米结构体系。它根据物质在纳米尺寸下的特殊物理、化学等物性和现象，有效地将原子或分子组合成新的纳米结构，并以其为基础，设计、制作、组装成新材料、器件或系统，使它们产生全新的功能，为人类带来崭新的机会与发展空间。

计算科学作为新兴交叉学科，采用第一性原理、分子动力学、蒙特卡罗方法等先进计算方法，通过计算机模拟研究许多复杂的物理、化学、材料科学和生命科学现象；或可设置超出当前实验能力所及的参量范围，研究无法重复观察的实验现象。它使计算机模拟越来越多地成为理解复杂现象和复杂工程系统建模的重要手段，并广泛应用于模拟复杂的社会和经济系统。近年来，在许多科学与工程领域中都逐步形成了计算性学科分支，如计算力学、计算物理、计算化学、计算生物、计算地震学等。

生物信息学是一门新兴的交叉学科，它以核酸、蛋白质等生物大分子为主要研究对象，以数学、物理、化学、信息科学、计算机科学等科学为主要手段，以计算机硬件和软件为主要工具，对生物大分子数据进行存储、管理、注释、加工，使之成为具有明确意义的生物信息，并通过对序列和结构数据及其相关文献

的查询、搜索、比较、分析，从中获取基因编码、基因调控、代谢途径、核酸和蛋白质结构功能及其相互关系等知识。生物信息学还可在大量信息和知识的基础上，探索生命起源、生物进化以及细胞、器官和个体的发生、发育、病变、衰亡等生命科学中的重大问题。

化学反应和生命现象的“过程”其实都是物理的过程，满足能量守恒和能量极小的原理。至今许多这样的“过程”仍然是未知的。要进一步探究化学反应和生命现象的“内在本质”需要在分子和原子层面加以解释，这就需要考虑分子、原子、电子间复杂的相互作用。由此发展了量子化学、量子生物学等交叉科学。例如，对于遗传问题，孟德尔在 19 世纪，从生物现象上总结了豌豆的遗传规律。但为什么会有这种规律呢？显然与遗传物质的结构有关。1953 年，生物学家沃森和晶体学家克里克在英国卡文迪许实验室发现 DNA 分子结构。沃森、克里克和威尔金斯，因其有关核酸分子结构的发现及其对生命物质的遗传信息传递的巨大意义，获得了 1962 年的诺贝尔生物学或医学奖。后来，人们用分子、原子的相互作用理论解释了产生 DNA 结构的原因。现在，我们知道，遗传规律与 DNA 分子结构中某些单元的排列顺序有关，也就是说，在分子结构中有个密码存在。如果密码改变，遗传情况也就改变了。由此可以看到，理解了分子层次的结构，就把遗传规律基本上搞清楚了。

## 二、物理特性的测量是自然科学各学科不可缺少的

由物理学原理发展起来的光学、电学、磁学、力学、热学等的测量技术成为自然科学所有学科的必备技术。例如，X 射线衍射和由之衍生的电子衍射与中子衍射，导致了晶体结构分析的发展，它为凝聚态物理和材料科学奠定了基础，而且大大地促进了化学、生物学和矿物学的研究。1895 年德国物理学家伦琴发现了 X 射线，为此荣获 1901 年首届诺贝尔物理学奖。一百多年来，与 X 射线有关的研究、应用不计其数，多项成果获得诺贝尔物理学、化学、生理学或医学奖。其中获物理学奖的主要成果有：居里夫妇的放射性的发现、劳厄的 X 射线分析晶体结构、巴拉克的元素的标识 X 辐射的发现、西格班的 X 射线的光谱学研究、康普顿的 X 射线散射及德拜的 X 射线的电子衍射，等等。获化学奖的成果主要是结构化学领域、生物化学领域的多项研究，包括胰岛素分子结构、DNA 核苷酸顺序以及基因结构的确定，等等。生理学或医学奖也有很多与 X 射线有关，比如 X 射线人工诱变、DNA 结构的发现和破译、重要用途药物的晶体结构、X 射线断层成像技术（CT），等等。

又如，光学显微镜在生命科学、地理科学中被广泛地用来观察动植物结构。电子显微技术超越了光学显微技术的分辨极限。20 世纪 80 年代以后，扫描隧穿显微技术发展成为花样繁多的显微探针技术，不仅实现了原子尺度的成像，还实现了多种原子尺度的测量和操作技术。随后又发明了原子力显微镜和磁力显微镜，它们已经在材料科学研究中发挥了重要作用。

此外，电子天平、电泳仪、恒温箱、精密温度测定仪、压力计、电势差计等

在化学实验中是常见的仪器。而利用光学和光谱学方法测量物性在生命科学、材料科学、环境科学中用得特别多，典型的仪器有红外吸收光谱仪、分光光度计、液相色谱仪、气象色谱仪等。由此可见，物理特性的测量是自然科学各学科不可缺少的。

### 三、物理实验的基本方法是教学重点，也是素质教育的基本要求

大学物理的教育价值体现在物理学蕴含的思想以及观念中，体现在物理学对世界发展的深远影响中。20世纪对世界影响深远的大事中，物理学革命位列第一，爱因斯坦的相对论和普朗克量子假说从根本上改变了人们关于时间、空间、物质和运动的概念。物理学是研究物质、能量和它们之间相互作用的学科，对人类未来的进步起着关键的作用，因此对物理教育的支持和研究在国内外受到广泛关注。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。

因此，本课程的具体任务是：

(1) 培养学生的科学实验基本技能，提高学生的科学实验基本素质，使学生初步掌握科学实验的思想和方法。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) 提高学生的科学素养，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。

## 第二节 物理实验课的基本程序和要求

### 一、大学物理实验课的基本程序

#### 1. 实验预习

实验前的预习是学生上好实验课的关键。实验预习要求学生在课前做好以下工作：

(1) 认真阅读实验教材和有关资料，从中整理出实验的基本原理和方法。

(2) 熟悉所用仪器的基本性能、工作原理、工作条件以及操作规程。

(3) 明确完成实验的思路和方法，掌握实验成功的关键因素和注意事项。

(4) 在做好上述准备工作的基础上写出预习报告（实验报告模板的预习部分）。

实验报告模板（课程网站可下载，可直接打印，也可在实验报告纸上按照模板格式抄写）中的预习部分作为实验报告的一部分需要认真手工填写，预习部分的内容一般含有预习思考题、实验原理等。

课程网站为 <http://course.ujn.edu.cn/dxwl.html>，点击进入后选择“大物（实

验课)”。

## 2. 上实验课

上实验课是学生到实验室完成实验任务的过程。学生进入实验室上课，必须携带实验教材、已经填写预习部分的实验报告、原始数据记录纸等。上课时老师会先检查学生的预习情况，并简要介绍实验的原理、方法、要求以及仪器使用的注意事项等。学生要结合自己的预习情况学习领会，并要格外注意老师所强调的注意事项。

做实验时，学生要注意以下几个问题：

(1) 安装调节仪器时，要注意使仪器的布局要合理。在进行测量时，必须满足仪器的正常工作条件（水平、垂直、工作电压、光照等），并按仪器的操作规程进行。

(2) 要科学地、实事求是地记录下实验中观察到的现象和测得的数据，同时记录与实验结果有关的实验条件（如温度、湿度等）和实际使用仪器的名称、型号等。实验数据一定要直接记录在原始数据记录纸上，注意有效数字和单位要正确。

若发现测得的数据有误，切不可在原数据上直接涂改，而要用一段横线将其划掉，在旁边补上正确的数据，使正误数据都能清晰可辨，以备分析讨论之用。

(3) 测量完成后，要对测得的数据进行分析，在肯定结果基本正确后，将实验的原始数据记录交由老师审阅签字。数据签字后方可整理仪器（将其恢复原样），打扫卫生，经老师允许后离开实验室。

## 3. 完成实验报告

课后需要尽快将本次实验报告的剩余部分填写完整，实验报告是学生向实验指导老师提交的关于自己工作成果的总结报告，要求其简洁明了、字迹工整、图表规范。一份完整的实验报告，应在完善预习报告的基础上增加以下内容：

(1) 实验现象和数据的观测记录（此项工作是将原始记录上所记的内容整理到实验报告纸上，而不是指原始数据记录）。

(2) 数据处理。数据处理包括计算实验结果，绘制实验图线，进行误差或不确定度分析等。在进行计算时，一定要写出计算公式，并将实验数据代入公式中。

(3) 实验结果表达（或结论表述），并对实验结果作正确的分析与讨论。

(4) 实验小结、讨论、回答思考题等。

(5) 在实验报告后附上有老师签字的原始记录（未附原始记录的报告无效）。

需要提醒的是，出现下列情况之一的原始数据记录无效。

① 用铅笔记录的原始数据记录无效。

② 经过涂改，或用橡皮、胶带纸、修正液更改过的原始数据记录无效。

③ 无实验指导老师签字的原始数据记录无效。

综上所述，大学物理实验教学是系统性的“工程”，既需要教师的指导，又

需要学生们的努力与勤奋,完全符合教育学中“以教师为主导,学生为主体”的教育思想。

## 二、物理实验中的安全事项

实验过程中应时刻注意人身与仪器的安全。仪器的安装与使用必须符合有关的技术规范。在操作前,应该了解所用仪器各旋钮、按键的作用。按实验步骤进行操作,未弄懂时严禁动手操作。

(1) 实验常用到 220 V 交流电,也用到几千伏的直流电(如激光电源)。为了保证实验者的人身安全和仪器设备的安全,以免触电、击穿、起爆、起火,实验者必须做到以下几点:

① 进入实验室后,在任课老师未同意之前,不准随意打开电源或触摸、调节实验仪器。

② 接、拆线路时,必须在断电状态下或消除静电后进行。

③ 操作时,人体不能触摸高压带电部位。

(2) 在改变电表量程或改接电路中任何一部分时,必须断开电源,以免发生危险或损坏仪器,改接电路完毕应再请教师检查。

(3) 做完实验后,先断电后拆线。若电路中有多种电源,先断易损电源(如标准电池)、再断其他电源,将仪器按要求放置整齐,将导线捆束整齐。

(4) 在需要加热的场合,防止明火,避免烫伤和被蒸汽灼伤,尤其是在热学实验中。

(5) 在使用强光或激光的场合,尤其应注意眼睛的防护,不使其过分疲劳。对激光光源,更应特别注意,绝对不允许用眼睛直接观看激光束,以免灼伤眼球。

## 三、关于大学物理实验课程的几点要求

1. 严格遵守实验室的各项规章制度,不得迟到和旷课。

2. 实验课前必须认真预习并写好预习部分,经指导教师检查合格后方可做实验。

3. 如有特殊情况必须在课前向实验指导教师请假,课后补假无效。

4. 严格遵守仪器设备使用操作规程,实验仪器准备完毕,需经指导老师允许方可通电启动。

5. 仪器发生不正常现象或损坏时,要及时向指导教师报告。凡属违反操作规程导致仪器设备损坏的要照章赔偿。

6. 实验中要严肃认真,以科学的态度真实记录实验结果和数据。

7. 实验结束时,记录的实验结果和数据要经指导教师检查和签字。要认真搞好实验室的清洁卫生,整理好实验现场,经指导教师同意方可离开实验室。

8. 实验课后要认真写好实验报告并按时送交。

## 第二章

# 实验数据处理的基础知识

### 第一节 测量与测量误差

#### 一、测量

物理是一门以实验为基础的学科。当人们对生产、生活中的现象进行研究时，经常要对各种量进行测量以获得客观的定量信息。测量是人类探知自然界的主要手段之一。而所谓测量，就是将被测量直接或间接地与标准量进行比较，从而确定被测量是该标准量多少倍的过程。

测量可分为直接测量和间接测量。凡能从测量仪器或量具上直接读出测量结果的都称为直接测量，如用米尺测长度、用天平测质量等，相应的被测量则称为直接测量量。凡是在直接测量量基础上，经由一定的函数关系运算后才能得到结果的称为间接测量，如声速的测量、转动惯量的测量等。显然，直接测量是间接测量的基础。

#### 二、测量误差及其分类

测量是测量者在一定的环境条件下，利用某种测量仪器和测量方法来进行的。在测量时，由于理论原理的近似性、实验仪器灵敏度的局限性、环境条件的不可控性等因素的影响，测量者读取的测量结果总不可能完全准确。因此，测量结果总会有误差存在。

##### 1. 测量误差

测量误差存在于一切测量中，并且不会消失。没有误差的测量结果是不存在的。随着科学技术的不断发展提高，误差可以逐步减小，但不会减小到零。我们把被测物理量在一定客观条件下的真实大小，称为该物理量的真值，而把某次测量得到的值称为测量值。测量误差的大小反映了测量结果的准确程度，可以用绝对误差表示，也可以用相对误差表示。

$$\text{绝对误差} = \text{测量值} - \text{被测量真值} \quad (2-1-1)$$

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{被测量真值}} \times 100\% \quad (2-1-2)$$

##### 2. 测量误差的分类

既然测量误差存在于一切测量中，那么，分析测量误差的产生原因、合理地

选择测量方法、有效地减小测量误差、科学地表述含有误差的测量结果、正确地评价实验测量的结果等问题,就显得十分重要。通常,按照误差产生的原因和基本性质,可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

### (1) 系统误差

在相同条件下对同一物理量进行多次测量时,测量误差的大小和符号总保持不变,或者按某种确定的规律变化,这种误差称为系统误差。产生系统误差的主要原因如下。

① 仪器误差:测量所用仪器本身的缺陷,使用不当或未进行校准产生的误差,如电表零点未对准、天平砝码有缺损等。

② 原理误差:实验所依据的原理不够完善、理论公式的近似或实验条件达不到理论公式规定的要求等而造成的误差等,例如用伏安法测电阻没考虑电表内阻、用单摆测重力加速度忽略了空气阻力。

③ 人为误差:由于心理或感觉器官的灵敏度的差异或者个人不正确的习惯所造成的误差。

④ 环境误差:环境条件发生变化或测量仪器规定的适用条件没有满足等所造成的误差。

系统误差通常是实验测量的主要误差来源,但依靠多次重复测量一般都不能发现系统误差的存在。对系统误差的处理通常有两种方法:对于可以确定大小和符号的系统误差(称为可定系统误差),可以在测量过程中采取适当措施予以消除或在测量结果中进行修正;对不能确切掌握其大小和符号的系统误差(称为未定系统误差),一般只能估计其取值范围。

### (2) 随机误差

在不考虑系统误差的基础上,在相同条件下重复测量同一物理量,测量结果各不相同,总是围绕某一值“跳动”,测量误差的大小和符号也总是变化不定,这种误差称为随机误差。在测量次数少时,随机误差显得毫无规律可循,但当测量次数足够多时,随机误差的大小以及正负误差的出现都服从某种统计规律。

造成随机误差的因素是多方面的,主要是由于测量过程中一些随机的或不確定因素的微小变化所引起的,如仪器性能和测量者感官分辨能力的随机变化、环境条件的波动、测量对象的不确定变化。这些因素一般无法预知,也难以控制,所以测量过程中随机误差的出现带有一定的必然性。

绝大多数的随机误差都服从正态分布(高斯分布)。随机误差正态分布曲线如图 2-1-1 所示,该曲线横坐标  $\varepsilon$  为误差,纵坐标  $f(\varepsilon)$  即为误差的概率密度分布函数。它的意义是,误差出现在  $\varepsilon$  处单位误差范围内的概率。 $f(\varepsilon)d\varepsilon$  是误差出现在  $\varepsilon \sim \varepsilon+d\varepsilon$  区间内的概率,也就是图 2-1-1 中灰色部分的面积元。整个误差分布曲线下的面积为单位 1。在没有系统误差的条件下,当测量次数  $n \rightarrow \infty$  时,绝对值小的误差出现的概率大,绝对值大的误差出现的概率小,这体现了随机误差的单峰性;并且绝对值相等的符号相反的正、负误差出现的概率相等,这体现了对称性;如果将随机误差求和,由于正负误差互相抵消,各误差的代数和趋近



于零，这体现了抵偿性。

根据统计理论可以证明，函数  $f(\varepsilon)$  的具体形式为

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}} \quad (2-1-3)$$

式中， $\sigma$  是一个取决于具体测量条件的常量，称为标准误差，其对正态分布曲线的影响如图 2-1-2 所示。

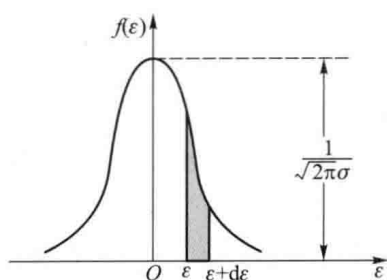


图 2-1-1 随机误差的正态分布曲线

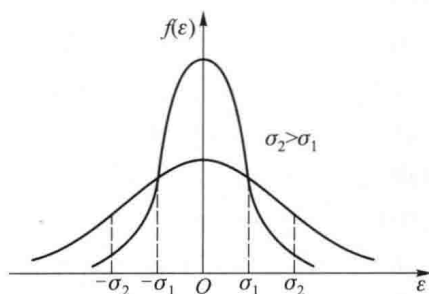


图 2-1-2  $\sigma$  对正态分布曲线的影响

综上所述，系统误差与随机误差在实验测量中总会同时出现，但他们有着不同的产生原因和不同的性质。因此，它们对测量结果的影响也各不相同。通常用准确度来表征测量结果的系统误差的大小，即测量结果对真值的偏离大小；用精密度来表征测量结果随机误差的大小，即对同一物理量在相同的条件下多次测量所得的各测量值相互接近的程度；而用精确度来表征对准确度和精密度综合评价。图 2-1-3 用射击打靶的结果进行类比，以说明这三个概念。

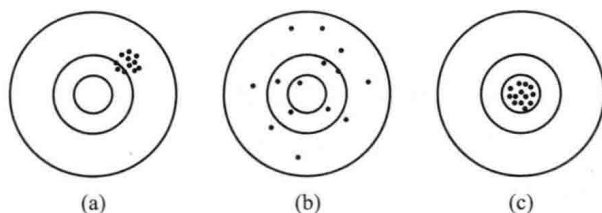


图 2-1-3 测量结果准确程度与射击打靶的类比

图 2-1-3 (a) 的弹着点明显偏离靶心，相对于靶心具有大致相同的偏离程度，即存在着较大的系统误差，是准确度低；但弹着点比较集中，紧密围绕着一特定点，离散程度不大，即精密度较高。图 2-1-3 (b) 弹着点比较分散，因此精密度不高；但是从弹着点分布情况来看，并没有明显的固定偏向，弹着点都围绕靶心平均分散，因此可以认为它的准确度是较高的。图 2-1-3 (c) 则不仅精密度高，而且准确度也高，可以说这一结果精确度高。

### (3) 粗大误差

粗大误差是一种明显超出统计规律预期值的误差，这类误差具有异常值。其出现通常是由测量仪器的故障、测量条件的失常及测量者的失误而引起的。带有粗大误差的实验数据是不可靠的。一旦发现测量数据中可能有粗大误差数据存



在, 应进行重测。如条件不允许重新测量, 应在能够确定的情况下, 剔除含有粗大误差的数据, 但必须十分慎重。

### 3. 误差的转化

由于未定系统误差具有随机性, 所以系统误差和随机误差在一定的条件下可以相互转化。例如, 直流电表在未用级别更高的标准表对其进行检定和修正之前, 由于不知道标尺每一分度处误差的大小和正负, 其测量误差属于随机误差; 但在经过校准测出修正曲线后, 就可得知标尺每分度误差的大小和正负, 并用它们对测量结果进行校正, 这时标尺分度的随机误差就转化为系统误差。又如使用钢尺测量长度时, 钢尺的某段刻度存在着大小和正负确定的系统误差, 但将物体放在标尺的不同位置进行多次测量时, 刻度的系统误差又转化为随机误差, 这种方法称之为系统误差的随机化技术。当系统误差的变化规律未知时, 用这种随机化技术可将未定系统误差转化为随机误差来处理, 以消除未定系统误差的影响。

## 第二节 测量结果的不确定度

对一个物理量进行测量后, 应综合分析测量误差的大小, 给出测量结果, 并对测量结果的可靠性作出评价。根据定义, 误差是评价测量结果的合适指标, 但由于误差是指测量值与真值之差, 而真值无法客观得到的, 因此误差也是无法知道的。为此近年来引入不确定度这一概念来评价测量结果的可靠程度。

### 一、不确定度

测量结果的不确定度 (简称为不确定度), 是对被测量的真值所处数值范围的评定。不确定度给出了在被测量平均值附近的一个范围, 真值以一定的概率落在此范围中。在测量方法正确的情况下, 不确定度越小, 标志着测量结果与真值的误差越小。

由于测量结果通常与多个物理量有关, 所以测量结果的不确定度也可能来源于若干因素, 这些因素使测量结果的不确定度形成若干分量。按照《国际计量局实验不确定度的规定建议书》中的评定方法, 用不确定度来评价测量的结果, 是将测量结果中可修正的可定系统误差修正以后, 再将剩余的误差划分为可以用统计方法计算的 A 类不确定度和用非统计方法估算的 B 类不确定度来表示。

#### 1. A 类不确定度分量 (简称 A 分量)

A 类不确定度指用统计的方法评定的不确定度分量, 用  $u_A$  表示。在大学物理实验课中, A 类不确定度主要体现在用统计方法处理随机误差上。

设对某一物理量在相同条件下进行  $n$  次重复测量, 得到一测量列  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 测量列的算术平均值为

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