



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理 实验教程

DAXUE WULI SHIYAN JIAOCHENG

第3版

王家慧 张连娣 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

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3版

王家慧 张连娣 戴允玢 贾贵儒 等编著



机械工业出版社

本书是中国农业大学非物理专业物理实验室在长期教学实践的基础上不断地总结教学、教改经验编写而成的。

全书共分五章，第一章测量误差与数据处理的基础知识；第二章预备知识；第三章基础实验；第四章近代物理测量分析方法与综合性实验；第五章设计性实验；书末附录介绍了国际单位制及部分常用导出单位。

本书为各类高等院校非物理（理、工、农、生命）专业的大学物理实验用书。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理实验教程/王家慧等编著. —3版. —北京：机械工业出版社，2010.9

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-29442-9

I. 大… II. 王… 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（2009）第243311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：李永联 责任编辑：李永联 封面设计：马精明

责任校对：李秋荣 责任印制：乔 宇

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2010年2月第3版第1次印刷

169mm×239mm · 15.75印张 · 304千字

标准书号：ISBN 978-7-111-29442-9

定价：26.00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

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010) 68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010) 88379649

读者服务部：(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

前 言

近二十多年来，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。新的理念、新的方法、新的实验技术和科研领域中的新成果已逐步在物理实验课中得到反映。本书是我们在多年教学实践的基础上，经过反复实践、积累经验、不断改进、充实完善编写而成的。本书可作为各类高等院校非物理（理、工、农、生命）专业的大学物理实验用书。

全书共分五章，根据先易后难和循序渐进的原则，将物理实验分为基础物理实验、近代物理测量分析方法与综合性实验和设计性实验三部分。第一章讲述了测量误差、不确定度和数据处理的基本知识，这些内容是本课程必须掌握的基本内容。第二章为预备知识，介绍了电学实验和光学实验中的一些基础知识和注意事项。第三章为基础实验，共选入 29 个实验，其中，有些实验包括多个使用不同测量方法和装置的实验内容，以供选择。第四章为近代物理测量分析方法与综合性实验，共选入 13 个实验。近代物理测量分析方法实验基本都是由计算机控制采集、处理数据，其中一部分在当前仍属于“高、精、尖”技术，但是，这就是 21 世纪的基本仪器和基本实验方法。第五章为设计性实验，共选入 7 个实验。设计性实验的一部分只给出研究对象、要求，并给予适当的提示，以培养学生的独立思考能力、应用物理知识的能力和创新能力；另一部分仅给出题目，限定了研究对象和方法，给学生留下充分的空间以发挥其聪明才智。书末附录介绍了国际单位制及部分常用导出单位。

本书增加了一部分传感技术的内容。传感技术是现代信息技术的主要组成部分。现代信息技术系统包括三个主要部分：传感器、通信系统和计算机。自动化程度愈高，系统对传感器的依赖性就愈大。因此，传感器对系统的功能起着决定性的作用。国内外都把传感技术列为尖端技术和重点发展技术。目前，传感技术的 95% 是基于各种物理原理、物理性质和物理效应。传感技术是物理学与经济建设间的桥梁，是检测技术的基础，是仪器仪表的核心。作为当代大学生，学

习、掌握、应用传感技术是解决实际问题的有力工具。

20 世纪人类最伟大的科技成果——相对论和量子力学是近代物理的基础和重要组成部分。近代物理测量分析方法是在此基础上产生的，并在近四十年有了惊人的进展。正是由于这种惊人的进展，人们对物质的结构和组成有了较过去深入得多的认识。近代物理测量分析方法的优点是：（1）速度快，适合于复杂混合物样品的成批分析；（2）信息多，有利于结构分析；（3）灵敏度高，样品用量少；（4）大部分可以实现非破坏性分析，可以用少量样品进行多种分析；（5）实现了自动化等。由于这些独特的优点，近代物理测量分析方法已经和正在取代部分传统经典测量方法和相当部分的化学分析方法。近代物理测量分析方法主要包括：激光测距、激光定位、激光测平、红外测温、红外成像、干涉成像、气相色谱、高效液相色谱、原子发射光谱、原子吸收光谱、紫外-可见分光吸收光谱、傅里叶红外吸收光谱、激光拉曼光谱、质谱、核磁共振、X 射线荧光光谱、电子能谱、扫描隧道显微镜、电子显微镜，等等。先进的工具就是先进的生产力。21 世纪的高级人才，无论是什么专业的，学习、了解、掌握这些先进的工具都是完全必要的。

物理实验内容必须与现代科学技术相结合，只有这样才能激发学生的学习积极性和热情。物理实验在实验内容选择方面应该在兼顾基础的同时注意时代性和先进性，只有这样才能缩小学校与企业、教学与科研的距离，使学生独立科研的能力得到锻炼和提高。

基础物理实验部分要求学生能够掌握仪器的基本原理、基本结构、基本使用方法，能够理解和运用物理学理论对实验现象进行初步分析与判断，能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。

综合性实验和设计性实验用以提高学生的综合实验能力并激发学生学习近代物理的热情，使学生不仅在根据测量条件及精度要求来确定实验方法、选择实验仪器等方面受到初步的训练，而且要训练学生应用已经学习过的物理知识，经过查阅文献、比较分析完成有一定难度的设计性实验，还要让学生学习、了解一些近代物理测量分析仪器的测量对象、测量精度、结构原理，学习基本操作，并会用计算机采集数据、处理数据。

综合性实验的近代物理测量分析方法部分已经开出有激光测距仪（+ 电子经纬仪）、扫描隧道显微镜、红外测温仪、紫外-可见分光光谱仪、傅里叶变换红外吸收光谱仪等实验。通过这些实验不仅要让学生学习了解这些仪器的基本原理、基本结构、基本使用，还要让学生了解近代物理知识与当代检测技术之间的密切关系，同时让他们从这些仪器的原理结构设计中学习、领会丰富的物理思想和灵活多变的物理方法。

A. 傅里叶变换红外吸收光谱仪：过去开的“迈克尔逊干涉仪”实验，让学

生数几百条干涉条纹, 学生觉得枯燥乏味, 并且“迈克尔逊干涉仪”涉及的物理知识面也较窄。我们现在选用的是傅里叶变换红外吸收光谱仪 (波长 $1.0 \sim 25 \mu\text{m}$, 波数 $10000 \sim 400 \text{cm}^{-1}$), 由计算机控制、采集、处理、显示、打印光谱。傅里叶变换红外吸收光谱仪的核心部分是干涉仪, 它涉及到的物理知识有: 普朗克黑体辐射、分子振动能量量子化、物质对电磁波的选择吸收、郎伯-比尔定理、振动的分解——傅里叶变换、光谱分析等。该光谱仪中的干涉仪是迈克尔逊干涉仪的变型——折射干涉仪, 其中用角反射器代替平面镜, 用光楔改变光程差, 用 He-Ne 激光器的干涉图谱作基尺。

B. 激光测距仪 (+ 电子经纬仪): 量程 3km , 误差小于 6mm , 斜距、水平距、高差同时数字显示。它提供了一种速度快、精度高的大长度测量手段。

C. 红外测温仪: 量程 $-32 \sim 900^\circ\text{C}$, 分辨率 0.1°C , 距离系数 60, 响应时间 0.5s , 测量结果数字显示。与其他测温方法相比, 它具有不接触、不影响被测物的温度场、远距离、响应快、重复性好、分辨率高等特点。

D. 紫外-可见分光光谱仪: 核心部分是单色仪, 波长 $190 \sim 900\text{nm}$, 由计算机控制、采集、处理、显示、打印光谱, 并要求厂家按照我们的设计对原紫外-可见分光光谱仪进行改造, 使之既可以作物质成分的定量分析, 又可以用做各种光源、光电器件和介质的光谱分析。

E. 扫描隧道显微镜: 工作原理是基于量子力学中的隧道效应, 在平行和垂直于样品表面方向的分辨率分别可达 0.1nm 和 0.01nm , 是纳米技术中进行表面分析的最佳工具。扫描隧道显微镜使物理实验的长度测量向小量程扩展到了纳米。

通过这些实验, 让学生感受到数字时代的测量精度, 感受到当代大型仪器的使用方法, 感受到近代物理与当代检测技术之间的紧密联系。这些实验所用的观察和测量方法是从宏观进入微观, 从直接进入间接, 包含着种种推理和计算。实际上这也正是现代科学实验的一般趋势。我们希望学生在经过这样的实验训练后, 能够在方法论和认识论上有一个质的演变和升华。

实验教材离不开实验室的建设和发展, 经过几十年的教学实践, 经过多次调整、更新和扩充, 我们才达到目前的规模和水平。这里面凝聚了几代教师和实验技术人员的智慧和劳动。本书多数实验都包含着许多同事的先后的贡献, 这里难以逐一记载他们的业绩。近几年来参加原实验教材编写工作的沈人德、盛毅、刘红疆、申兵辉、王卫、张建军等老师对本书的编写提出了许多宝贵建议, 在此表示感谢。

参加本书编著工作的有王家慧 (第三章的大部分), 张连娣 (第三章的部分、第四章的部分), 戴允盼 (第一章、第三章的部分和第四章的部分), 贾贵儒 (绪论、第二章、第四章的部分和第五章), 常清英 (实验 A24, B8)、左淑

VI 大学物理实验教程

华 (实验 B7, B10)、韩萍 (实验 A13, A25)、祁铮 (实验 A17)、刘小云 (实验 C4)、宋敏 (实验 B11)、黄峰 (实验 B12)、王学进 (实验 B13)。

本书不仅包含了中国农业大学五十年来物理实验教学实践的积累,还吸收了兄弟院校的优秀教改成果,展现了近几年来我们对物理实验教学新体系探索的尝试。

书中难免会有错漏之处,谨请读者指教,以便改进,作者将不胜感激。

编著者
2009 年 11 月

目 录

前 言

绪 论	1
第一章 测量误差与数据处理的基础知识	5
第一节 测量与误差	5
第二节 误差的分类及其特点	6
第三节 测量结果的不确定度评定	10
第四节 有效数字的记录与运算	14
第五节 用作图法处理实验数据	16
第六节 实验数据的直线拟合	17
第二章 预备知识	20
第一节 电学实验预备知识	20
第二节 光学实验预备知识	23
第三节 信号处理	25
第三章 基础实验	28
实验 A1 长度与固体密度测量	28
实验 A2 用拉伸法测金属丝的弹性模量	36
实验 A3 碰撞	40
实验 A4 用单摆测重力加速度	46
实验 A5 驻波	47
实验 A6 测定空气的比热容比	50
实验 A7 液体表面张力系数的测定	52
实验 A8 用奥氏粘度计测液体的粘度	55
实验 A9 用转筒法和落球法测液体的粘度	57

实验 A10	刚体转动惯量的测定	62
实验 A11	用单臂电桥研究金属电阻温度系数	68
实验 A12	用补偿法测电池的电动势	72
实验 A13	利用霍尔效应测磁场	76
实验 A14	等厚干涉 用牛顿环测曲率半径	79
实验 A15	单缝衍射实验	82
实验 A16	用旋光仪测定糖溶液的浓度	85
实验 A17	光的偏振	88
实验 A18	阴极射线示波器	90
实验 A19	分光计应用一——用光栅测定光波的波长	99
实验 A20	分光计应用二——用棱镜测定光波的波长	107
实验 A21	迈克耳逊干涉仪	110
实验 A22	光电效应测定普朗克常数	116
实验 A23	全息照相	119
实验 A24	声速的测定	123
实验 A25	基本电学量的测量	126
实验 A26	用椭偏仪测量薄膜厚度	131
实验 A27	金属热膨胀系数的测量	138
实验 A28	夫兰克-赫兹实验	140
实验 A29	微波分光仪实验	147
第四章 近代物理测量分析方法与综合性实验		152
实验 B1	用单色仪测定介质的吸收曲线	152
实验 B2	测量光电元件相对光谱特性	156
实验 B3	紫外-可见吸收光谱	159
实验 B4	温度测量的综合性实验	165
实验 B5	用电位差计研究温差电偶的特性	172
实验 B6	傅里叶变换红外 (FTIR) 吸收光谱仪	176
实验 B7	扫描隧道显微镜 (STM)	182
实验 B8	激光测距	188
实验 B9	长度测量的综合性实验	193
实验 B10	共振法测量弹性模量	197
实验 B11	脉冲傅里叶变换核磁共振	200
实验 B12	光镊微操纵实验——光的力学效应及光阱力的测量	207
实验 B13	激光喇曼谱	212

第五章 设计性实验	220
实验 C1 误差配套	221
实验 C2 电表的改装和校正	223
实验 C3 用谐振子测重力加速度	228
实验 C4 伏安法测电阻	230
实验 C5 实验仪器的选择和误差分配	234
实验 C6 望远镜的设计	236
实验 C7 显微镜的设计	237
附录 国际单位制 (SI) 介绍	239
参考文献	241

绪 论

17 世纪牛顿不仅把当时已知的全部知识整理归纳在一起,而且非凡地预见到未来的科学发展。牛顿力学建立后,被顺利地推广到了刚体、流体、热力学、统计力学、电动力学,使力学、热学、电学、化学等学科联系在了一起。由此,牛顿力学也成为了各门科学的理论基础,大至日月星辰,小到原子分子,似乎无不被牛顿理论体系所包罗。20 世纪初,爱因斯坦完成了相对论,以普朗克、玻尔和爱因斯坦为首的一大批物理学家建立了量子力学。

在自然科学领域中,人们习惯把人类社会的发展过程分为“农业社会”、“工业社会”和“信息社会”三个时期。如果说牛顿力学支撑起工业社会的大厦,即牛顿是工业社会的奠基人,那么爱因斯坦和普朗克、玻尔等则是信息社会的奠基人。

物理学是一门集哲学的概括性和抽象性、数学的严密性和逻辑性、实验的实践性和操作性于一身的科学。物理学是自然科学的核心,是新技术的源泉。物理学从本质上说又是一门实验科学,物理规律的研究都以严格的实验事实为基础,并且不断受到实验的检验。在物理学的发展中,实验一直起着重要作用,今后在探索和开拓新的科技领域中,实验仍然是有力的工具。在大学里,物理实验课是对学生进行科学实验基础训练的一门无法取代的、单独开设的重要课程。学生通过物理实验主要是学习各种方法。方法是能力的体现。具体实验仅仅是方法的载体,上实验课时绝不能仅满足于完成实验内容,而是要领会这个实验包含的那些方法。综合性实验是难度较大、包含方法较多的实验。设计性实验是要求学生把已学到的方法、原理进行新的组合并加以应用。创新需要一定的积累,创新就是积累的升华。可以说,物理实验课是学生在大学里学习或从事科学实验的起步。同时,在培养科学工作者的良好素质及科学世界观方面,物理实验也起着潜移默化的作用。因此,学好物理实验对于高等院校各专业的学生是十分重要的。

物理实验中所涉及的物理定理、定律早已确认,不需验证。物理实验不同于其他专业课实验,学生今后不会再重复这些实验,因此,应该视每一具体的实验仅仅是一个载体。通过这一载体不仅要使学生熟悉基本实验仪器、基本实验方法,熟悉数据采集、处理、分析和表达的方法,同时要培养学生的观察能力、思维能力、分析能力和综合判断能力。从这个层面来看,力、热、声、光、电和近代物理实验的比率并不重要,考虑一个实验取舍的依据应该是,通过这个实验学生可以受到哪些方面的训练,加深了对哪些物理思想、物理方法的领会,拓展了

哪些新知识,这才是最重要的。突出物理思想、物理方法在各领域中的应用应是非物理专业开设物理实验的宗旨。

一、物理实验课的目的

对当代大学生来说,不仅要有比较深厚的理论知识,而且要具备较强的从事科学实验的能力。物理实验课是与物理理论课并行的独立课程,具有自身独特的教学内容、教学方法和教学目的。动手能力和观察分析能力等都具有独立性,是不能用理论思维能力来代替的。大学物理实验是对学生系统地进行科学实验能力训练的开端和基础,在培养学生理论联系实际,加强操作动手能力,以及培养与提高学生的科学素质和创新能力等方面都有着十分重要的作用。通过物理实验课,大学生不仅要接受科学实验各环节上的基本训练,还要加深对物理思想方法的领会,并拓展知识。本课程的具体任务是:

1. 学习和掌握物理实验的基本知识

通过对物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习和掌握物理实验基本知识、基本方法和基本技术,懂得如何运用实验原理和方法去研究某个物理问题,加深对物理学原理的理解,熟悉常用仪器的基本原理、结构性能及使用方法。

2. 培养与提高学生的科学实验能力

(1) 自学能力——能够自行阅读实验教材,作好实验前的准备。对于实验中出现的基本问题,能够通过查阅资料而得到解释。

(2) 动手能力——能够对实验仪器设备正确布局联接,借助教材或说明书正确使用仪器,具体测试,获得较准确的实验结果。能够排除实验中的简单故障,掌握和运用基本的物理实验技能。

(3) 分析能力——理论联系实际,能够对实验现象进行初步分析、判断和解释,用理论去指导实验。

(4) 表达能力——能够正确记录和处理实验数据,绘制实验曲线,分析说明实验结果,撰写合格的实验报告。

(5) 设计能力——对于简单问题,能够从研究对象或课题要求出发,自己阅读资料,依据某项原理,设计实验方法,确定实验参数,选择配套仪器,拟定实验程序。

3. 培养和提高学生的科学实验素养

要求学生具有实事求是、理论联系实际的科学作风,严肃认真、不怕困难、刻苦努力的科学态度,不断探索、勇于创新的科学精神,以及遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品德。

二、物理实验课的主要教学环节

大学物理实验课程所涉及的内容多数是测量某一物理量,或研究某一物理量

随另一物理量变化的规律。在本课程中, 为了加强科学实验能力的培养, 将实验内容划分成了若干个相对独立的单元, 每单元中实验内容循序渐进, 教学时各单元间进行循环。但是, 无论每个单元内的实验内容及要求如何, 也无论实验采用哪一种方法, 以及每个单元的内容、实验时间如何安排, 物理实验课的程序大致相同, 一般可分为以下三个基本环节。

1. 实验前的预习

每个实验都是一项具体工作, 理解原理、掌握方法、熟悉仪器设备及测量数据的任务一般都比较繁重, 而实验课的课内时间有限, 不允许在实验课内才从头开始。为了提高教学效果, 做到胸有成竹、有的放矢, 学生必须做好实验前的预习。预习一般应做到:

(1) 预习实验教材: 实验前应认真阅读实验教材, 掌握实验的原理和方法, 对实验内容和要求应全面了解, 明确该实验的重点和难点, 并预习有关仪器使用说明等。预习时应根据实验任务画好记录数据的表格, 计划好测量次数等, 以便实验能及时、全面地获得需要测量的数据。有些实验还要求学生课前自拟实验方案, 自行设计线路图或光路图, 自拟数据表格等。因此, 课前预习的好坏是实验中能否取得主动的关键。

(2) 写好预习报告: 为了帮助学生做好预习准备工作, 每单元都布置一定的预习思考题, 要根据教师的要求, 把预习思考题做在实验报告纸上, 这有助于学生对实验原理的理解和方法的掌握等。每次实验前, 教师将检查预习报告, 没有达到要求者, 将不允许做实验。

2. 实验中的观测

实验是整个教学中最重要的一环。动手能力、分析问题和解决问题的能力培养, 主要在具体实验时完成。因此, 必须充分利用课内的有限时间, 提高教学效果。一般应注意:

(1) 认真听讲: 每次实验前, 教师将就本次实验的内容和要求、仪器的使用和注意事项、以及难点、重点及提示等作简要讲解, 学生应认真听讲并做好记录。

(2) 进行实验: 学生进入实验室后应遵守实验室规则。首先应熟悉仪器, 严格按照仪器设备操作规程进行实验。应根据实验方法及内容, 合理布局, 像一个科学工作者那样要求自己, 井井有条地布置仪器, 安全操作, 注意细心观察实验现象, 认真钻研和探索实验中的问题。不要期望实验工作会一帆风顺, 在遇到问题时, 应看做是学习的良机, 冷静地分析和处理它。仪器发生故障时, 也要在教师指导下学习排除故障的方法。总之, 要把着眼点放在实验能力的培养上, 而不是测出几个数据就以为完成任务了。

(3) 记录数据: 应把实验中测量的原始数据及实验现象及时记录下来。一

般应包括以下几个方面：

- 1) 实验的条件，如温度、湿度等。
- 2) 仪器的规格、型号、参数等。
- 3) 正确按照有效数字记录实验数据并注意物理量的单位。
- 4) 及时记录实验中自己认为有意义的现象，并注意反复观察分析。

记录数据使用原始数据记录纸，用钢笔或圆珠笔书写整齐。要严肃对待实验数据，如确系记错了，也不要涂改，应轻轻划上一道，在旁边写上正确值（错误多的，必须重新记录），使正误数据都能清晰可辨，以便在分析测量结果和误差时参考。不要用铅笔记记录，给自己留有涂改的余地，也不要先草记在另外的纸上再抄写在数据表格里，这样容易出错。希望学生从一开始就不断地培养良好的科学作风。实验结束时，将实验数据交教师审阅签字，认为合格后方可整理仪器，结束实验，以避免数据不合格而需重新连接仪器。整理还原仪器后方可离开实验室。

3. 实验报告

实验报告是实验工作的全面总结，是培养科学表达能力的主要环节。实验结束后，应根据每个单元的要求及时写出实验报告。报告一律采用统一的实验报告纸书写，要求文字工整、语句简练、阐述清楚、图表规范，结果正确、分析认真。一份完整的实验报告应包括以下几方面：

- 1) 实验名称、实验者姓名、学号、实验日期。
- 2) 实验目的。

3) 实验原理摘要：简要叙述有关物理内容（包括电路图或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，公式成立所应满足的实验条件等，不要照抄书本。

4) 实验内容：根据实际的实验过程写明关键步骤，观察了哪些物理现象，测量了哪些物理量。

5) 数据表格与数据处理：以完整的实验数据计算、作图和表示测量结果。

6) 误差分析：包括两方面的内容，一是计算测量结果的不确定度，它是对测量结果的评价，与获得正确的测量结果具有同等重要性；二是要找出影响测量结果的主要因素，必要时给出每一因素对测量结果影响的量化估计值，从而采取必要的措施，以改进实验。

7) 小结或讨论：内容虽然广泛，但是一定要针对性强，可以是实验中现象的分析，对实验关键问题的研究体会，实验的收获和建议，也可以是解答思考题。

实验报告应在实验后一周内交实验老师。

第一章 测量误差与数据处理的基础知识

物理实验的任务不仅是要定性观察各种物理现象，更重要的是要寻找有关物理量之间的定量关系，为此就需要进行测量。测量中的误差是不可避免的，即使随着科学技术的发展，人们实验手段的提高，测量误差可以被控制得较小，但是绝对不可能使误差降为零。所以测量误差理论及数据处理的基本知识在整个物理实验中占有非常重要的地位。没有测量误差的基本知识，就不可能取得正确的测量值；不会处理数据或处理数据方法不当，就得不到正确的实验结果。而作为一个测量结果，不仅应给出被测物理量的数值和单位，而且必须对测量值的可靠性作出评价，一个没有误差评定的测量结果是没有价值的。本章主要介绍测量误差估计、实验数据处理和实验结果的表示，等等。所介绍的都是初步知识，这些知识不仅在以后每一次物理实验中都要用到，而且是今后从事科学实验所必须学习和掌握的。应当说明的是：有关误差问题的深入讨论涉及计量学及数理统计学的理论，本书只引用它们的某些结论和计算公式，更详细的探讨和证明留待数理统计课中学习。

第一节 测量与误差

测量是物理实验的基础。研究物理现象、了解物质特性、学习物理原理都要进行测量。所谓测量，就是用一定的量具或仪器，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。测量分为直接测量和间接测量等。“直接测量”是指把待测物理量与作为标准的物理量相比较。例如，用米尺测物体的长度，用天平和砝码测物体的质量，用电流计测线路中的电流，都是直接测量。“间接测量”是指利用已知函数关系和直接测量量，经过计算得到另一个物理量的测量。例如，测量铁圆柱体的密度时，先直接测出该圆柱体的质量 m 、直径 d 和高度 h ，然后根据公式 $\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}$ 计算出铁的密度。在物理实验中进行的测量，有许多是间接测量。

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。而同一个测量者，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的多次测量，称为等精度测量。必须要说明的是，一切

物质都在运动中，没有绝对不变的人和事物。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。

实践证明：测量结果都存在误差，误差自始至终存在于一切科学实验和测量过程之中。因为任何测量仪器、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，这些就使测量不可避免地伴随有误差产生。因此，分析测量中可能产生的各种误差，尽可能消除其影响，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。为此，我们必须了解误差的概念、特性、产生的原因和估计方法等有关知识。

测量误差就是测量结果与待测量的真值（或约定真值）之差值。测量误差的大小反映了测量结果的准确程度，测量误差可以用绝对误差表示，也可以用相对误差表示。

绝对误差 $\delta = \text{测量结果} - \text{被测量的真值}$

$$\text{相对误差 } E = \frac{\delta}{\text{被测量的真值}} \times 100\%$$

被测量的真值是一个理想概念，一般说来真值是实验者不知道的。在实际测量中常用被测量的实际值或已修正过的算术平均值来代替真值，称为约定真值。

第二节 误差的分类及其特点

测量中的误差按其产生的原因与性质主要分为两大类型，即系统误差和随机误差。

一、系统误差

在相同条件下，多次测量同一个物理量时，测量值对真值的偏离总是相同的，这类误差称为系统误差。造成系统误差的原因为下列诸方面：

(1) 由于测量仪器的不完善，仪器不够精密或安装调节不妥。如刻度不准、零点不对、砝码未经校准、天平臂不等长、应该水平放置的仪器未放水平，等等。

(2) 由于实验理论和实验方法不够完善，引起理论与实验条件不符。如在空气中称质量却未考虑空气浮力的影响，测长度时未考虑温度对长度变化的影响，量热时未考虑热量的散失，测电压时未考虑电压表内阻对电路的影响或标准电池的电动势未作温度修正，等等。

(3) 由于实验者缺乏经验等主观因素而引入的误差。例如，使用秒表计时，有人总是操之过急，有人又总是反应迟缓；再如，有人对准目标时，习惯性地偏左或偏右，偏上或偏下。

系统误差的特点是恒定性，不可能依靠增加测量次数的方法使之减小。

对实验中的系统误差应如何处理呢？可以通过校准仪器、改进实验装置和实验方法，或对测量结果进行理论上的修正，使误差消除或尽可能减小。发现和减小实验中的系统误差是一个有一定难度的工作，需要对整个实验依据的原理、方法、测量步骤、所用仪器等可能引起误差的因素逐一进行分析。一个实验结果是否正确，往往就在于系统误差是否已被发现并尽可能消除，因此对系统误差不能轻易放过。

二、随机误差（又称偶然误差）

随机误差是指在相同条件下，在对同一被测量进行多次测量过程中，绝对值与符号以不可预知的方式变化着的测量误差的分量。这种误差是实验中各种因素的微小变动引起的。例如，实验装置和测量机构在各次调整操作上的变动性，测量仪器指示数值的变动性，观测者本人在判断和估计读数上的变动性，等等。这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量的平均值发生有涨落的变化，这变化量就是各次测量的随机误差。随机误差的出现，就某一测量值来说是没有规律的，其大小和方向都是不能预知的，但对一个量进行足够次数的测量，则会发现它们的随机误差是按一定的统计规律分布的。常见的一种情况是：正方向误差和负方向误差出现的次数大体相等，数值较小的误差出现的次数较多，数值很大的误差在没有错误的情况下通常不出现。这一规律在测量次数越多时表现得越明显，它就是称之为正态分布律的一种最典型的分布规律，在数理统计中对它有充分的研究。

1. 随机误差的正态分布规律

大量的随机误差服从正态分布（或称高斯分布）规律。标准化的正态分布曲线如图 1-1 所示。图中横轴表示随机误差 δ ，纵轴

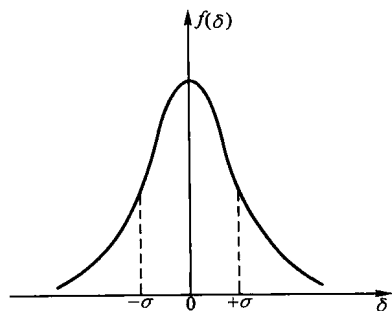


图 1-1

$f(\delta)$ 为随机误差 δ 的概率密度， $f(\delta)$ 的物理含义为：在误差值 δ 附近单位误差间隔内，误差出现的概率。且有

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

上式中 σ 称为正态分布的标准差
$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2} \quad (1-2)$$

σ 为曲线上拐点处的横坐标，它是表征随机误差分散性的重要参数。 σ 越小，测量精密度越高，曲线越陡，峰值越高，随机误差越集中，测量重复性越好； σ 越大则反之。 σ 对 $f(\delta)$ 的影响如图 1-2 所示。

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