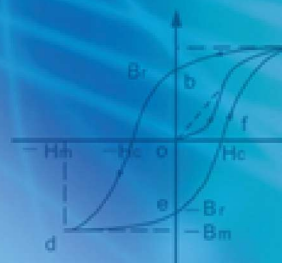
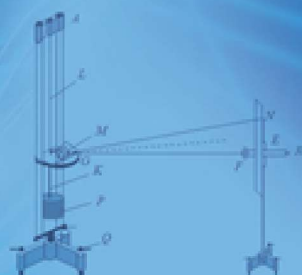


高等教育公共基础课精品系列规划教材

大学物理实验



© 主编 游 泳 邓建杰 张 静 沈 洋

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

高等教育公共基础课精品系列规划教材

大学物理实验

主编 游 泳 邓建杰

张 静 沈 洋

主审 汤 照

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

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课程,是大学生实践创新能力的重要基础。本书是根据教育部颁布的“非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求”,结合当前北京理工大学珠海学院物理实验教学的实际情况,总结物理实验教学改革成果而编写的。

本书基于培养大学生基础实验创新素质的教学目标,贯穿实验创新意识、实验创新基本技能与方法、实验创新能力和实验创新思维的总体设计。全书共六章,主要包括测量与数据处理、物理实验的基本测量方法、常用仪器及其操作技术、基本物理量的测量、综合实验训练、设计性实验训练。书末附录介绍了国际单位制和常用物理量参考值,以便查阅。

本书可作为高等学校各专业基础物理实验课的教材,也可作为涉及物理学的相关人员的参考读本。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 游泳等主编. —北京:北京理工大学出版社, 2019.2

ISBN 978-7-5682-6688-8

I. ①大… II. ①游… 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(2019)第 017049 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 11

字 数 / 260 千字

版 次 / 2019 年 2 月第 1 版 2019 年 2 月第 1 次印刷

定 价 / 30.00 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

本书是根据教育部颁布的“非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求”，结合当前北京理工大学珠海学院物理实验教学的实际情况，总结物理实验教学改革成果而编写的。在教材编写过程中，吸取了近几年出版的许多优秀物理实验教材的优点，根据多年的物理实验教学经验，在原自编教材基础上重新编撰完成。

本教材在内容选择和编写过程中，主要考虑以下几个方面：

(1) 将物理实验的基本理论、实验方法、常用仪器操作技术和基本物理量的测量集中进行归纳总结，编写在第一章、第二章、第三章和第四章中。这些理论包括测量不确定度及数据处理方法、基本物理实验方法、常用仪器操作与调节技术、测量基本物理量的方法等。其中对不确定度的简化处理方法进行了较好的介绍。

(2) 在实验项目分类上，根据当前实验教学的实际，按实验训练的性质和层次分为综合性实验和设计性实验，按照由技能和方法训练到创新训练逐步提高的原则进行编排。

(3) 在编写实验内容的过程中，从实验全过程出发，按照实验进行的顺序介绍实验内容，便于教学组织和学生规范实验，即在实验导读中明确学生学习成果，了解仪器结构和原理，阅读实验原理和实验任务，最后进行数据处理和实验思考。

(4) 在设计性实验的选题上，既考虑了学校的实际也兼顾了教学基本要求的满足，既有操作设计的内容也有原理性设计的内容，这种选题有利于拓展学生的创造性思维。

(5) 在一些实验项目的编写中，考虑到不同实验方法和仪器完成同一实验内容，以及同一实验方法和仪器完成不同实验内容的安排，对部分实验项目进行了拓展训练描述，使本书可有不同的适用对象。

(6) 本书在编写实验项目时，将基础性物理实验项目融入常用仪器操作和基本物理量的测量中，突显其模块化和基础性，教学中可根据中学物理实验掌握程度和不同学校情况进行灵活安排基础性实验项目。综合性和设计性实验项目比物理实验教学基本要求所规定的最低学时多遴选了一些近代物理中有重大影响的项目，其中综合性实验项目二十项，设计性实验选题十四项，以适应不同的专业选择。

(7) 本书部分实验项目，尤其是常用仪器及其操作技术，尝试采用 VR 新技术进行立体化教材的建设，以适应开放式教学和虚拟化实验室建设的需要。

本书的内容是北京理工大学珠海学院物理系许多教师和实验室工作人员集体智慧的结晶。参加本书编写的人员有：绪论、第一章、第二章及总附录由游泳编写；第三章由沈洋编写；第四章由张静编写；第五章 § 5-1~§ 5-3、§ 5-14 部分由张静编写，§ 5-4、§ 5-5、§ 5-9 部分由沈洋编写；§ 5-6~§ 5-8、§ 5-10~§ 5-13、§ 5-15、§ 5-20 部分由邓建杰编写，§ 5-16~§ 5-19 部分由游泳编写；第六章由邓建杰编写。全书由游泳、邓建杰、张静、沈洋主编，游泳统稿。

本书由汤照副教授审稿，在审稿过程中为本书提出了很好的修改意见。

由于编者水平有限，书中难免存在不完善和不妥当之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
第一章 测量与数据处理	4
§1-1 测量	4
§1-2 误差	6
§1-3 测量结果的不确定度	7
§1-4 实验数据处理	14
习题	19
第二章 物理实验的基本测量方法	21
§2-1 比较法	21
§2-2 放大法	22
§2-3 补偿法	23
§2-4 转换法	24
§2-5 模拟法	26
第三章 常用仪器及其操作技术	27
§3-1 力学仪器	27
§3-2 电学仪器	32
§3-3 光学仪器	44
第四章 基本物理量的测量	50
§4-1 长度	50
§4-2 质量	53
§4-3 时间	54
§4-4 电流	55
§4-5 温度	57
§4-6 发光强度	60
§4-7 物质的量	60
第五章 综合实验训练	62
§5-1 转动惯量的测量	62
§5-2 杨氏模量的测量	69
§5-3 基本电气安装	74
§5-4 声速的测定	76
§5-5 超声波无损检测技术	82
§5-6 固体线膨胀系数的测量	87
§5-7 不良导体导热系数的测量	89

§5-8 箔式应变片传感器	93
§5-9 表面无损检测技术	97
§5-10 铁磁材料磁滞回线	100
§5-11 霍尔效应测磁场	104
§5-12 太阳能电池基本特性测定	109
§5-13 等厚干涉——牛顿环	112
§5-14 分光计的调节及三棱镜顶角测量	115
§5-15 衍射光栅	119
§5-16 迈克尔逊干涉仪测波长	122
§5-17 光电效应	127
§5-18 密立根油滴实验	131
§5-19 弗兰克-赫兹实验	137
§5-20 射线无损探伤	141
第六章 设计性实验训练	146
§6-0 设计性、研究性实验概述	146
§6-1 多方案测量食盐密度	150
§6-2 物体在液体中的运动研究	150
§6-3 用热敏电阻改装温度计	151
§6-4 大电阻的测量	151
§6-5 非线性电阻特性研究	152
§6-6 电表改装与校准	152
§6-7 用双臂电桥测低阻值电阻	153
§6-8 微小长度的测量	153
§6-9 望远镜的组装	154
§6-10 木板的转动惯量测量研究	154
§6-11 用示波器测未知信号的频率	155
§6-12 用尺读望远镜进行光学测距	155
§6-13 多普勒效应测小车速度	156
§6-14 整流滤波电路的设计与制作	156
总附录	157
参考书目	163

绪 论

1. 物理实验在科技发展史上的重要性

科学是以实验为基础的，实验才是科学之父。伟大物理学家伽利略曾经说过：“一切推理都必须从观察与实验中得来”，科学实验是人们运用科学仪器探求自然过程变化规律的一种科学活动，具备实验目的、实验方案、实验过程、实验结果分析等要素。

物理实验是物理学的科学实验活动。物理学是自然科学和工程技术的重要基础，人类文明和技术进步都有赖于物理学的发展。力学的发展使人类更好地认识了自然界；热力学和分子物理学的发展，使人类迈向了蒸汽机时代；电磁学的发展，使人类进入了电气化时代；近代物理学的发展，才有了半导体、激光、电子计算机等现代科学技术，使人类步入了高速信息化的网络时代。

2002年由全美物理学家提名有史以来最美丽的十大物理实验（见表0-1），体现了物理实验的科学之魂：由简单的仪器和设备，发现了最根本、最单纯的科学概念。这些经典物理实验犹如历史丰碑，扫开了人们长久的困惑和含糊，开辟了对自然界的崭新认识，同时也揭示了科学是自然界最神圣的权威，而不是科学家。

表 0-1 最美丽的十大物理实验

序号	实验名称	重要作用
1	电子双缝干涉实验	证明了物质波的存在，为量子力学的建立提供了实验基础
2	自由落体实验	运用理想实验和科学推理，展示了尊重科学，不畏权威的精神，成为广义相对论的重要实验基础
3	密立根油滴实验	精确测量了电子电荷电量，首次通过实验证实了物质世界的不连续性
4	三棱镜分光实验	不仅为颜色理论奠定了基础，而且为光谱学的研究开辟了道路
5	光的双缝干涉实验	证实了光的波动力学说，为干涉计量学的研究开辟了道路，为一个世纪后量子学说的创立起到了至关重要的作用
6	卡文迪许扭矩实验	证实万有引力的存在，精确测量了万有引力常数，对天体力学、天文观测学以及地球物理学具有重要的实际意义
7	埃拉托色尼测量地球圆周长实验	证明了地球的球形结构，准确测量其大小，为环球旅行、地理发现以及天文学的发展奠定了基础
8	斜坡加速度实验	揭示了物体运动的真实规律，开创了科学实验方法，对物理学乃至整个自然科学产生了深远影响
9	卢瑟福散射与原子有核模型实验	揭示了原子的内部结构，是一个开创新时代的实验，为原子物理学以及核物理学奠定了实验基础
10	傅科钟摆实验	首次用实验证明地球自转及科里奥利力的存在，为地球物理学奠定了实验基础

2. 大学物理实验课的目的与任务

大学物理实验课是高等理工院校对学生进行科学实验基本训练的必修课程,是理工类本科生进入大学后的第一门实验类课程,是大学生实践创新能力的重要基础,反映了各个自然学科科学实验的共性和普遍性问题。大学物理实验课覆盖广泛的学科领域,具有多样化的实验方法和手段,激发学生实验创新意识,培养学生掌握基本实验技能和方法,训练学生实验综合创新能力,使学生养成严谨的科学实验创新思维,引导学生确立正确的科学思想和科学方法,在应用型人才的实践创新素质培养方面有着不可替代的重要作用。

课题组自 2012 年起全面深化大学物理实验教学改革,构建了“四类五创”的大学物理实验教学体系(见图 0-1),以培养大学生以“基础实验创新素质”为目标,围绕“演示类、基础类、综合类、设计创新类”四种实验类型,明晰五个创新素质培养层次和六种科学实验基本能力。

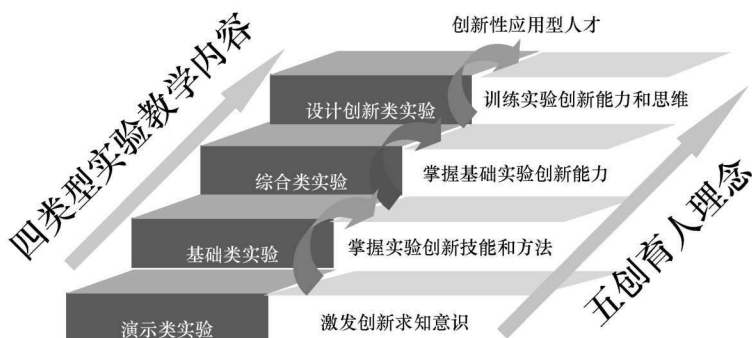


图 0-1 “四类五创”大学物理实验教学体系

物理实验创新素质:

- (1) 观察自然界的物理现象,探知基本物理规律,激发创新求知意识。
- (2) 掌握长度、波长等基本物理量测量及误差分析等基础实验创新技能。
- (3) 掌握作图法、交换法、非电量电测等物理实验方法的基础实验创新方法。
- (4) 掌握运用物理学知识、基本技能和基本方法开展实验研究的基础实验创新能力。
- (5) 训练开展物理实验科学实验所需科学实验思维、正逆向思维等基础实验创新思维。

物理实验基本能力:

- (1) 能够通过阅读实验教材或资料,基本掌握实验原理及方法,为进行实验做准备。
- (2) 能够借助教材或仪器说明书,在老师指导下,正确使用常用仪器及辅助设备,加深对实验设计思想的理解。
- (3) 能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断,逐步学会提出问题、分析问题和解决问题的方法。
- (4) 能够正确记录和处理实验数据,绘制实验曲线,分析实验结果,撰写合格的实验报告。
- (5) 能够完成符合规范要求的具有设计性内容的实验。
- (6) 在老师指导下,能够查阅有关方面科技文献,用实验原理、方法能够进行简单的具有研究性或创意性内容的实验。

3. 怎么做好物理实验

1. 实验预习

在进行实验前必须预习，明确实验目的，理解实验原理和内容，了解测量仪器和测量方法，了解实验过程和注意事项。预习报告是实验工作的前期准备，是写给自己参考用的，故要求简单明了。实验前应清楚本次实验应达到什么目的，通过什么实验方法和测量哪些数据才能实现实验的目的。

在预习的基础上撰写预习报告，内容包括：实验名称、实验目的、主要实验仪器设备、原理简述（原理图、电路图或光路图，以及主要计算公式等）、实验步骤、列出记录数据的表格（写出已知量、指定量、待测量和各量的单位）、准确回答预习思考题。

2. 实验操作

进入实验室后，按照编组号使用相应的实验仪器。实验过程中要求遵守实验室规则，了解实验仪器的使用及注意事项，正式测量之前可作试验性探索操作。实验过程中仔细观察和认真分析实验现象，如实记录实验数据和现象（用钢笔或圆珠笔记录数据，原始数据不得改动！）。实验完毕后有条件的可上机处理实验数据或经指导教师核准数据并签字认可后，方可整理仪器，离开实验室。

3. 实验报告

实验报告必须充分反映自己的工作收获和结果，反映自己的能力水平，具有自己的特色。实验报告要有条理性，并注意运用科学术语；必须要有实验的结论和对实验结果的讨论、分析或评估。实验原理要简明扼要，要有必要的电路图或光路图和主要的数据处理过程，一定要正确表示实验结果，尤其是利用作图求得的一些物理量。

实验报告内容应在预习报告的基础上，补充完善以下内容：实验过程记录、实验数据记录、数据处理计算的主要过程、作图及实验结论、实验现象分析、误差评估与不确定度计算、小结和讨论等。

第一章 测量与数据处理

物理实验不仅要定性观察各种物理现象，更重要的是运用科学仪器和实验方法，通过测量来找出有关物理量之间的定量关系，探求自然过程的变化规律。而实验测量受到实验环境、实验仪器、操作者等因素的影响，绝不可能绝对准确，所以需要测量结果的可靠性做出评价，对其误差范围做出估计。本章主要介绍测量和数据处理的基本知识。

§ 1-1 测 量

在物理实验中，一切物理量都是通过测量得到的，测量是人们对自然现象和实体进行数量描述的一种认识过程，物理测量的范围很广，在空间方面已小到原子核内部 $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{ m}$ ，大到整个宇宙大小为百亿光年，数量级相差在 10^{40} 倍以上。在时间方面某些粒子寿命已短到 $10^{-23} \sim 10^{-24} \text{ s}$ 的瞬间，而宇宙的年龄长达百亿年，两者数量级相差也在 10^{40} 倍以上。所谓测量，就是用一定的工具或仪器，通过一定的方法，将待测的物理量与一个选作计量标准单位的同类量进行比较。以选作标准的同类量为单位，选作计量单位的标准必须是国际公认的、唯一的、稳定不变的。

1960 年，国际计量大会正式通过了一种通用于一切计量领域的单位制——国际单位制，用符号“SI”表示，规定了米（长度）、千克（质量）、秒（时间）、安培（电流）、开尔文（温度）、摩尔（物质的量）和坎德拉（发光强度）7 个基本单位，我国采用中华人民共和国法定计量单位，是以国际单位制（SI）为基础的单位，其他物理量的单位均由这些基本单位导出，称为国际单位制的导出单位。任何工厂生产的量具、仪表都要经过计量单位检验鉴定才能出售使用。

选定一个单位后，用它与被测对象进行比较，得到被测对象与它的比值——倍数，即为数值。显然数值的大小与所选用的单位有关，对同一对象测量时，选用的单位越大，数值越小，反之亦然。因此，一个测量数据不同于一个数值，它是由数值和单位两部分组成的。一个数值有了单位，才具有特定的物理意义，这时它才可以被称为一个物理量。因此测量所得的值（数据）应包括数值（大小）和单位，两者缺一不可。

1. 测量的分类

根据测量对象来分，可分直接测量和间接测量两类。直接测量是指把待测物理量直接与预先标定好的仪器、量具进行比较，直接从仪器、量具上读出量值的大小。例如，用米尺测量长度，用电流表测电流，用天平称衡物体质量，用秒表计量时间等。间接测量是指按一定的函数关系，由一个或多个直接测量量计算出另一个物理量。在物理实验中进行的物理量测量，大多要通过间接测量得到。例如，测一个圆柱体的密度时，先测出该物体的直径 D 、高度 h 和质量 m ，再用公式 $\rho = \frac{4m}{\pi D^2 \cdot h}$ 计算出物体的密度。

根据测量精度来分,可分为等精度测量和非等精度测量,等精度测量是同一测量者在相同的条件下,用同样的方法和同样的仪器对同一物理量进行的多次测量。等精度测量中各次测量的结果可能不同,但没有理由认为哪一次或哪几次的测量更可靠或更不可靠。而一旦上述测量条件中任一项发生变化,导致明显影响测量结果,则称之为非等精度测量。而一般所说的测量都是指等精度测量。

2. 测量仪器的精度

测量结果的精密度和正确度与测量仪器的精确度等级密切相关,通常用精度和级别来描述仪器的精确度等级,这是由制造厂家和计量机构使用更准确的仪器、量具检定比较后给出的。

仪器精度是指能分辨的物理量的最小值,精度越高,仪器的分度越细,允许的偏差就越小。在正常使用条件下,用某种级别的测量仪器,对最大允许偏差(简称最大允差,也叫公差或仪器极限误差)有具体规定,用 $\Delta_{\text{允}}$ 表示,可在产品说明书或仪器手册中查找(见表1-1)。

表 1-1 部分常用实验仪器的最大允差

仪器名称	量程	最小分度值	最大允差
钢板尺	150 mm 500 mm 1 000 mm	1 mm 1 mm 1 mm	± 0.10 mm ± 0.15 mm ± 0.20 mm
钢卷尺	1 m 2 m	1 mm 1 mm	± 0.8 mm ± 1.2 mm
游标卡尺	125 mm	0.02 mm 0.05 mm	± 0.02 mm ± 0.05 mm
螺旋测微器(千分尺)	0~25 mm	0.01 mm	± 0.004 mm
七级天平(物理天平)	500 g	0.05 g	0.08 g(接近满量程) 0.06 g(1/2 量程附近) 0.04 g(1/3 量程附近)
三级天平(分析天平)	200 g	0.1 mg	1.3 mg(接近满量程) 1.0 mg(1/2 量程附近) 0.7 mg(1/3 量程附近)
普通温度计(水银或有机溶剂) 精密温度计(水银)	0~100 ℃ 0~100 ℃	1 ℃ 0.1 ℃	± 1 ℃ ± 0.2 ℃
电表(0.5 级) 电表(0.1 级)			0.5%×量程 0.1%×量程

3. 测量结果的定性描述

对同一物理量进行多次等精度测量,其测量结果可以用正确度、精密度和精确度来表述。

如图 1-1 所示,测量结果犹如散点,左图弥散性较大,均值在中间则为正确度好而精密密度差;中图正确度差而精密密度好;右图正确度和精密密度都好,其精确度高。

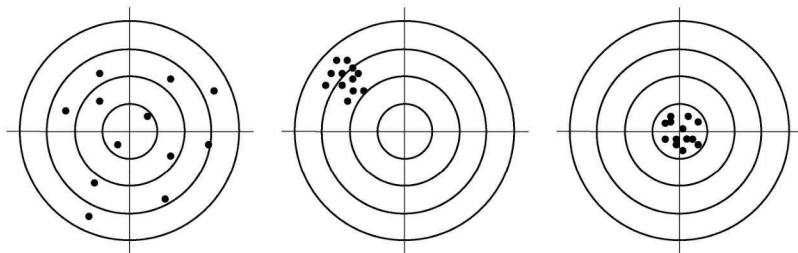


图 1-1 测量结果的定性描述示意图

【例 1】以用游标卡尺测量圆柱体直径为例（实际值为 3.22 cm），分别测三组，每组测量 9 次，如表 1-2 所示。

表 1-2 用游标卡尺测量圆柱体直径所得的三组数据

组数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3.20	3.16	3.44	3.32	3.10	3.12	3.08	3.32	3.26
2	3.30	3.32	3.34	3.36	3.32	3.34	3.36	3.36	3.32
3	3.20	3.22	3.26	3.24	3.20	3.18	3.20	3.22	3.24

请同学们定性分析三组测量结果。

§ 1-2 误 差

在实际测量过程中，由于测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员的水平以及种种因素的局限，不可能使测量结果与客观存在的真值完全相同，我们所测得的只能是某物理量的近似值。也就是说，任何一种测量结果的量值与真值之间总会或多或少地存在一定的差值，这一差值称为该测量值的测量误差，简称误差。

1. 误差的分类

实验测量误差反映了实验结果的可靠性，从误差的产生原因和性质上可将误差分为系统误差、随机误差和过失误差三大类。

1) 系统误差

系统误差的特点是有规律性但不符合统计规律性，在相同条件下，多次测量同一物理量时（等精度测量），其测量值都大于真值，或者都小于真值，或在测量条件改变时，误差也按一定规律变化。系统误差的来源大致有以下几种：

(1) 由于实验理论和方法的不完善，造成理论与实验条件不相符。例如，比萨斜塔实验中未考虑空气的浮力；测热量时未考虑热量的耗散、标准电池的电动势未作温度修正等。

(2) 由于测量仪器的不完善、仪器不够精密或安装调整不合适。例如，温度计的刻度不准；砝码质量不准；仪器零点没有调准；仪器未调整成水平或铅直等。

(3) 由于实验者生理或心理原因产生的影响。例如，记录某一信号时有滞后或超前的倾向，眼睛辨色能力较差导致测量值偏大等。

系统误差能否用恰当的方法发现和消除，是测量者实验技能的体现，应尽可能采取各种措施将它降到最低，如对理论关系式的修正、对仪器进行校正、更换实验者进行测量结果比对等。

因此，对实验初学者来说，应该逐步积累实验测量的感性知识，对实验过程和结果多进行分析、讨论，学会发现系统误差，进而减小、修正直至消除系统误差。

2) 随机误差

随机误差的特点是无法控制、符合统计规律性。在相同条件下，多次测量同一物理量，其测量值以不可预知的方式围绕平均值起伏变化，这些变化量就是各次测量的随机误差。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多次的测量，则会发现它们的随机误差是按一定的统计规律分布的，常见的分布有正态分布、均匀

分布、 t 分布等。

3) 过失误差

过失误差是由于实验者操作不当、读数不正确、记录有误等因素所造成，不属于实验的正常测量范畴，应当避免或克服。除端正实验态度、严格按照实验规程操作之外，可用其他测量的结果进行比对纠正，或多次测量判别过失误差，对过失误差产生的异常数据予以剔除。若并非过失误差产生的异常数据应予以谨慎对待。

测量总是存在着一定的误差，但实验者应该根据要求和误差限度来制订或选择合理的测量方案和仪器。不能不切合实际地要求实验仪器的精度越高越好；环境条件总是恒温、恒湿、越稳定越好；测量次数总是越多越好。一个优秀的实验工作者，应该是在一定的要求下，以最低的代价来取得最佳的实验结果。要做到既保证必要的实验精度，又合理地节省人力与物力。误差自始至终贯穿于整个测量过程之中，为此必须分析测量中可能产生各种误差的因素，尽可能消除其影响，并对测量结果中未能消除的误差做出评价。

2. 误差的表示

在已知被测物理量真值的情况下，误差可直接用绝对误差或相对误差表示，即

$$\text{绝对误差: } \Delta x = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \mu|}{n} \quad (1-1)$$

$$\text{相对误差: } u_x = \frac{\Delta x}{\mu} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中， μ 表示被测物理量的真值； x_i 表示物理量的第 i 次测量值； n 为测量次数。

绝对误差反映了测量值偏离真值的大小和方向，相对误差则表示绝对误差对测量结果的影响程度。绝对误差和相对误差越大，测量结果越不准确。

§1-3 测量结果的不确定度

长期以来，人们均用绝对误差和相对误差来表征测量结果的可靠性。但测量物理量的真值是无法确定的，它只是一个实验上的理想值或约定值。为了更为科学地表征实验结果，1992 年国际计量大会以及四个国际组织制定了具有国际指导性的《测量不确定度表达指南》，1993 年，该指南经国际理化等组织批准实施。1986 年，我国计量科学院发出了采用不确定度作为误差数字指标名称的通知。1992 年 10 月 1 日，我国开始执行国家计量技术规范 JJG 027—1991《测量误差及数据处理（执行）》，规定测量结果的最终表示形式用总不确定度或相对不确定度表达。本书参照上述指南和国家规范，结合我国高校物理实验教学的实际情况，讲述测量不确定度的基本原理和具体应用。

1. 直接测量结果的不确定度

测量不确定度反映了测量值的可信赖程度，是被测量值在某一范围内的评定方法。测量不确定度按数值的估计方法分为 A 类不确定度和 B 类不确定度两类，前者为统计不确定度，后者为非统计不确定度。

1) A 类不确定度

测量中凡是符合统计规律的不确定度（如随机误差）统称为 A 类不确定度，用 u_A 来表示。

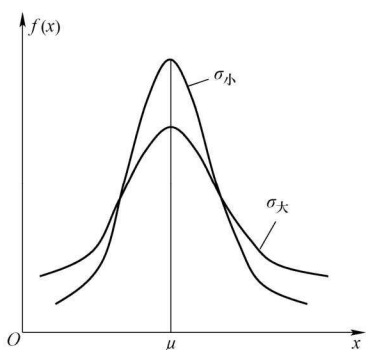


图 1-2 正态分布曲线

在不出现过失误差的正常实验情况下,实验测量值是围绕测量平均值出现不可预见的上下涨落,若等精度的测量次数相当多,则服从一定的统计规律。在物理实验中,多次独立测量得到的数据一般可近似看作正态分布。正态分布的特征可以用正态分布曲线形象地表示出来,如图 1-2 所示。图中 $f(x)$ 表示测量值的概率密度函数。

正态分布服从以下特点:

- (1) 单峰性。与平均值相差越大,出现的概率越小。
- (2) 对称性。与平均值相差的绝对值相等时,正负偏差出现的概率相等。
- (3) 有界性。绝对值很大的偏差出现的概率趋近于零。
- (4) 抵偿性。误差的算术平均值随着测定次数的增加而越来越趋近于零,算术平均值越接近真值。即当 $n \rightarrow \infty$ 时

$$\frac{1}{n} \sum \Delta x_i \rightarrow 0, \text{ 因此 } \bar{x} \rightarrow \mu。$$

由概率论可以给出下面几个重要的统计值及其含义。

对某一物理量等精度的 n 次测量值:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$$

测量结果的算术平均值:

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

测量值 x 的概率密度函数:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (1-4)$$

置信概率(表示变量 x 在 (x_1, x_2) 区间出现的概率):

$$P = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (1-5)$$

测量值的标准差 σ (反映测量值的离散程度):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n-1}} \quad (n \rightarrow \infty) \quad (1-6)$$

$$P(\mu \pm \sigma) = \int_{\mu-\sigma}^{\mu+\sigma} f(x) dx = 0.683$$

$$P(\mu \pm 2\sigma) = \int_{\mu-2\sigma}^{\mu+2\sigma} f(x) dx = 0.954$$

$$P(\mu \pm 3\sigma) = \int_{\mu-3\sigma}^{\mu+3\sigma} f(x) dx = 0.997$$

3σ 准则又称拉依达准则:当 $n \rightarrow \infty$ 时,任何一个测量值落在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 区间上的置信概率为 99.7%,凡是超出该区间的测量值可予以剔除,这就是 σ 的统计意义。

根据抵偿性,可采用算术平均值来替代真值计算,则任意一次测量值的标准差可表述为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (n \rightarrow \infty) \quad (1-7)$$

当测量次数趋于无限时, 算术平均值将无限接近待测物理量的真值, 因此我们更希望知道 $\bar{x}$ 对真值的离散程度, 即算术平均值的标准差。由概率论可以证明算术平均值为 $\bar{x}$ 的标准差, 即 A 类不确定度 u_A 为:

$$u_A = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum(\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (1-8)$$

此式表明在多次测量符合正态分布时, 真值处于 $(\bar{x} - u_A, \bar{x} + u_A)$ 区间的概率为 68.3%。

值得注意的是测量次数相当多时, 测量值才近似为正态分布, 上述结果才成立。在测量次数较少的情况下, 测量值将呈 t 分布。测量次数较少时, t 分布偏离正态分布较多, 当测量次数较多时 (例如多于 10 次) t 分布趋于正态分布。在 t 分布下, A 类不确定度修正为:

$$u'_A = t_p u_A \quad (1-9)$$

即要与正态分布具有相同置信概率情况下, 置信区间为 $(\bar{x} - t_p u_A, \bar{x} + t_p u_A)$, t_p 与测量次数和置信概率有关。表 1-3 列出了置信概率 P 分别为 0.683、0.95 和 0.99 时不同测量次数下的 t_p 值。

表 1-3 t_p 与 n 的关系

n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	∞
$t_{0.683}$	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.04	1.03	1
$t_{0.95}$	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.15	2.09	1.96
$t_{0.99}$	9.93	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.25	2.98	2.86	2.58

【例 2】测量一个长度值, 其测量值如表 1-4 所示。

表 1-4 测量一个长度值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L/cm	42.35	42.45	42.37	42.33	42.30	42.40	42.48	42.35	42.29

求置信概率为 0.95 时, 该列测量值的平均值、标准差和 A 类不确定度。

解: 由式 (1-3) 求算术平均值:

$$\bar{x} = \frac{42.35 + 42.45 + 42.37 + 42.33 + 42.30 + 42.40 + 42.48 + 42.35 + 42.29}{9} = 42.369 (\text{mm})$$

由式 (1-6) 求标准差 ($n=9$):

$$\sigma = \sqrt{\frac{(42.35 - 42.369)^2 + (42.45 - 42.369)^2 + \cdots + (42.29 - 42.369)^2}{8}} = 0.064 (\text{mm})$$

由式 (1-8) 求 A 类不确定度:

$$u_A = \sqrt{\frac{(42.35 - 42.369)^2 + (42.45 - 42.369)^2 + \cdots + (42.29 - 42.369)^2}{9 \times 8}} = 0.021 (\text{mm})$$

由于次数有限, 考虑 t 分布下的修正 (查表 1-3 可知, $P=0.95$, $t_p=2.31$):

$$u'_A = 2.31 \times 0.021 = 0.048 (\text{mm})$$

在人口统计、核物理计数中常用泊松分布, 此处不做讨论。

2) B 类不确定度

测量中凡是不符合统计规律的不确定度(如固有系统误差)统称为 B 类不确定度,记为 u_B 。为简单起见,在本书中主要考虑仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$,即由测量仪器本身产生的误差引起的测量不确定度。

(1) 仪器的最大允差。仪器误差是指在正确使用仪器的前提下,测量所得结果的最大允许误差或误差限,用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示。某些常用实验仪器的最大允差 $\Delta_{\text{仪}}$ 见表 1-1。

(2) 仪器的标准差。

仪器误差同样包含系统误差和随机误差两部分。究竟是哪个因素为主,取决于具体情况。一般而言,级别较高的仪表主要是随机误差,而级别较低的或工业用仪表则主要是系统误差。实验室常用仪表两种误差都有,且数值相近,根据实际,一次测量值的仪器标准差为:

$$u_B = \sigma_{\text{仪}} = \Delta_{\text{仪}} / C \quad (1-10)$$

C 为置信系数,由仪器测量误差在 $(-\Delta_{\text{仪}}, \Delta_{\text{仪}})$ 区间的概率分布决定。常用仪器的概率分布以及 C 的取值见表 1-5。

表 1-5 常用仪器的误差分布

仪器名称	米尺	游标卡尺	千分尺	物理天平	秒表
误差分布	正态分布	均匀分布	正态分布	正态分布	正态分布
C	3	$\sqrt{3}$	3	3	3

根据概率统计理论,对于符合均匀分布的 B 类标准差, $C = \sqrt{3}$, 即 $u_B = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3}$, 测量值误差在 $(-u_B, u_B)$ 区间的概率为 $P = 0.58$; 对于符合正态分布的 B 类标准差, $C = 3$, 即 $u_B = \Delta_{\text{仪}} / 3$, 测量值误差在 $(-u_B, u_B)$ 区间的概率为 $P = 0.68$ 。正态分布条件下,若置信概率取 0.950,则还需考虑置信因子 k_p (见表 1-6),即测量值的不确定度 $u_B = k_p \Delta_{\text{仪}} / 3$ 。

表 1-6 置信概率与置信因子的关系

P	0.500	0.683	0.900	0.950	0.955	0.990	0.997
k_p	0.675	1	1.65	1.96	2	2.58	3

3) 合成标准不确定度

国家技术监督局 1994 年建议,通常取置信概率为 0.95,同时需考虑展伸不确定度,这里不做详细介绍。综合考虑置信因子和展伸不确定度的影响,在具体实验中,可直接采用 $u_B = \Delta_{\text{仪}}$ 来计算。则被测物理量的合成标准不确定度可表述为:

$$U_x = \sqrt{(u'_A)^2 + u_B^2} = \sqrt{(u'_A)^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad P \geq 0.95 \quad (1-11)$$

4) 直接测量结果的最终表示形式

对于标刻度的量具和仪器,通常要估读到最小刻度的几分之一,如用米尺测量时,应估读到最小刻度(1 mm)的十分之一。测量值通常由能读准的位数加上估读组成,常把能读准的数字称为可靠数字,估读的一位数字称为可疑数字。某些仪器(如游标卡尺)和数字式仪表不需估读。当数值很大或很小时,用科学计数法来表示。例如, $(0.007\,24 \pm 0.000\,12)\text{ m}$ 写作 $(7.24 \pm 0.12) \times 10^{-3}\text{ m}$, 看起来就简洁醒目了。