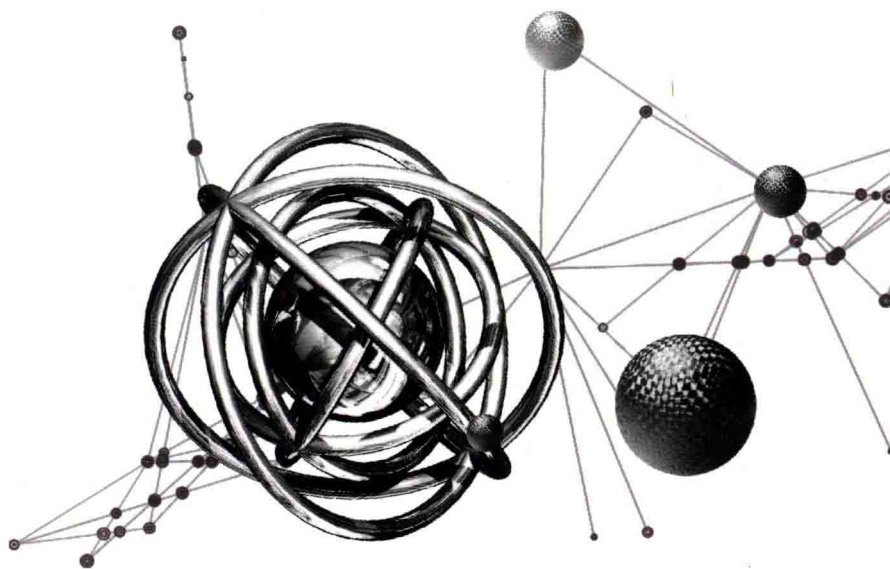


高等学校“十三五”
应用型本科规划教材



大学物理实验

(第二版)

• 主 编 王瑞平 张爱君
常 琳 舒 秦



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校“十三五”应用型本科规划教材

大学物理实验

(第二版)

主 编 王瑞平 张爱君
常 琳 舒 秦

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是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委员会于2010年制定的《理工类大学物理实验课程教学基本要求》编写而成的。全书包括力学、热学、电磁学、光学、近代物理实验共22种。书后附录给出了物理常数表、中华人民共和国法定计量单位(摘录)。

本书可作为高等院校工科专业和理科非物理类专业的本科或专科物理实验教材,也可作为实验技术人员、相关课程教师及其他科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/王瑞平等主编. —2版. —西安:西安电子科技大学出版社,2018.11
ISBN 978-7-5606-5031-9

I. ①大… II. ①王… 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(2018)第 255707 号

策划编辑 戚文艳

责任编辑 戚文艳

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西利达印务有限责任公司

版 次 2018年11月第2版 2018年11月第4次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 13

字 数 304千字

印 数 8301~11300册

定 价 29.00元

ISBN 978-7-5606-5031-9/O

XDUP 5333002-4

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

出版说明

本书为西安科技大学高新学院课程建设的最新成果之一。西安科技大学高新学院是经教育部批准，由西安科技大学主办的全日制普通本科独立学院。

学院秉承西安科技大学五十余年厚重的历史文化积淀，充分发挥其优质教育教学资源和学科优势，注重实践教学，突出“产学研”相结合的办学特色，务实进取，开拓创新，取得了丰硕的办学成果。

学院现设置有国际教育学院、信息与科技工程学院、新传媒与艺术设计学院、城市建设学院、经济与管理学院五个二级学院，以及公共基础部、体育部、思想政治教学与研究部三个教学部，开设有本、专科专业 44 个，涵盖工、管、文、艺等多个学科门类。

学院现占地 912 余亩，总建筑面积 22.6 万平方米，教学科研仪器设备总值 6000 余万元，现代化的实验室、图书馆、运动场、多媒体教室、学生公寓、学生活动中心等一应俱全。优质的教育教学资源、紧跟行业需求的学科优势，“产学研”相结合的办学特色，为学子提供创新、创业和成长、成才平台。

学院注重教学研究与教学改革，围绕“应用型创新人才”这一培养目标，充分利用合作各方在能源、建筑、机电、文化创意等方面的产业优势，突出以科技引领、产学研相结合的办学特色，加强实践教学，以科研产业带动就业，为学生提供了学习、就业和创业的广阔平台。学院注重国际交流合作和国际化人才培养模式，与美国、加拿大、英国、德国、澳大利亚以及东南亚各国进行深度合作，开展本科双学位、本硕连读、本升硕、专升硕等多个人才培养交流合作项目。

在学院全面、协调发展的同时，学院以人才培养为根本，高度重视以课程设计为基本内容的各项专业建设，以扎扎实实的专业建设，构建学院社会办学的核心竞争力。学院大力推进教学内容和教学方法的变革与创新，努力建设与与时俱进、先进实用的课程教学体系，在师资队伍、教学条件、社会实践及教材建设等各个方面，不断增加投入、提高质量，为广大学子打造能够适应时代挑战、实现自我发展的人才培养模式。学院与西安电子科技大学出版社合作，发挥学院办学条件及优势，不断推出反映学院教学改革与创新成果的新教材，以逐步建设学校特色系列教材为又一举措，推动学院人才培养质量不断迈向新的台阶，同时为在全国建设独立本科教学示范体系，服务全国独立本科人才培养，做出有益探索。

西安科技大学高新学院
西安电子科技大学出版社

2018 年 1 月

高等学校“十三五”应用型本科规划教材 编审专家委员会名单

主任委员 赵建会 孙龙杰

副主任委员 汪 阳 张淑萍 翁连正 董世平

委 员 刘淑颖 李小丽 屈钧利 孙 弋

吴航行 陈 黎 李禾俊 乔宝明

前 言

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委员会于2010年制定的《理工类大学物理实验课程教学基本要求》，结合多年工科物理实验的教学实践以及教学改革和课程建设的经验，参照历年使用的教材编写而成，适用于各类高等院校工科专业和理科非物理专业的本科物理实验教学。

本书具有以下特点：

(1) 按照国家计量技术规范“JJF1059—2012”的要求，全面使用测量不确定度表示评定实验的测量结果，以替代原测量结果中的测量误差部分。

(2) 按照2010年制定的《理工类大学物理实验课程教学基本要求》配置全书内容，合理安排了基础性实验、综合性实验和设计性实验内容，使学生通过本书的学习既掌握基本的实验技能，又具有初步的实验设计能力。

(3) 将常用的物理实验方法和实验室常用的仪器单列讲解，方便学生学习和查阅。

(4) 在选材内容处理上，注意了起点低、终点高，并且注意对学生实验技能的培养和实验方法的训练。注重理论与实践的联系，使学生可以较好地运用和掌握理论知识。

(5) 结合具体实验，适当介绍了相关的物理实验史料和物理实验在现代科学技术中的应用知识，以开拓学生的视野，提高学生的兴趣。

(6) 新增了当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术实验内容，如激光技术和传感器技术等。

全书共分八章，第一章由浅入深地讲解了测量误差、测量不确定度和实验数据处理的方法；第二章讲解了物理实验常用测量方法；第三章讲解了物理实验常用仪器；第四章是力学、热学的基础性实验内容；第五章是电磁学实验内容；第六章是光学实验内容；第七章是近代物理实验内容；第八章是设计性实验内容；书后附录给出了最新的物理常数表、中华人民共和国法定计量单位(摘录)，以方便学生查阅。

本书由王瑞平教授主编，王瑞平(绪论)、张爱君(第一章、第三章)、郭亚丽(第二章)、常琳(第四章、第五章)、孟泉水(第六章)、舒秦(第七章、第八章)等参与本书的编写。

本书在编写的过程得到了杨华平老师的大力帮助，在此向他表示感谢。

物理实验教材的编写离不开物理实验室的建设，本书是实验室建设的集体结晶，在此向参与实验室建设的所有人员表示感谢。

在本书的编写过程中，作者借鉴和参阅了许多兄弟院校的相关教材，这些教材均列入书后的参考文献中，在此向其作者表示感谢。

由于作者水平有限，且时间较为仓促，书中难免有不妥之处，敬请同仁批评指正。

编 者

2018年6月

目 录

绪论	1
第一章 测量误差、测量不确定度和实验数据处理	4
1.1 测量误差基本知识	4
1.2 测量不确定度评定与表示	12
1.3 实验数据修约	23
1.4 实验数据处理方法	26
1.5 随机变量的统计分布	32
1.6 游标卡尺和螺旋测微计的使用	35
第二章 物理实验常用测量方法	40
2.1 比较法	40
2.2 放大法	41
2.3 转换法	42
2.4 补偿法	43
2.5 平衡法	43
2.6 模拟法	44
2.7 干涉法	44
第三章 物理实验常用仪器	45
3.1 力学、热学常用仪器	45
3.2 电磁学常用仪器	56
3.3 光学常用仪器	63
第四章 力学和热学实验	66
实验 1 金属杨氏模量的测定	66
实验 2 模拟制冷系数测定	71
实验 3 声速的测定	78
实验 4 运用示波器显示李萨如图形	85
第五章 电磁学实验	99
实验 5 模拟法测绘静电场	99
实验 6 惠斯通电桥测电阻	105
实验 7 电位差计测电动势	108
实验 8 利用霍尔效应测磁场	112
实验 9 磁聚焦法测定电子荷质比	116
第六章 光学实验	121
实验 10 干涉法测透镜的曲率半径	121
实验 11 分光仪的调整和玻璃折射率的测定	128
实验 12 用光栅测定汞灯光波波长	138
实验 13 单缝衍射的光强分布	141

实验 14	偏振法测葡萄糖溶液的浓度	147
第七章	近代物理实验	154
实验 15	利用光电效应测普朗克常数	154
实验 16	运用迈克尔逊干涉仪测定氦-氖激光器的波长	160
实验 17	利用密立根油滴仪测定电子电荷	168
实验 18	夫兰克-赫兹实验	176
第八章	设计性实验	183
实验 19	用激光显示李萨如图形	183
实验 20	电磁感应与磁悬浮力	185
实验 21	奇妙的红汞水——散射光研究	187
实验 22	霍尔传感器与杨氏模量的测量	188
附录		192
附录 1	物理常数表	192
附录 2	中华人民共和国法定计量单位(摘录)	197
参考文献		200

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，在人才的科学素质培养中具有重要的地位。

在物理学的发展过程中，实验起了重要的作用，物理理论及学说的提出无一不以实验观测为基础，而又进一步被实验所验证，如开普勒行星运动三定律的提出、牛顿万有引力定律的提出和经典力学体系的建立、能量守恒与转换定律的提出以及麦克斯韦电磁场理论的建立都是对实验、观测规律的总结。而 1846 年海王星和 1930 年冥王星的发现则是牛顿万有引力定律正确性的有力佐证；1887 年赫兹关于电磁波的实验则从实验上证明了麦克斯韦的电磁场假设，使之成为举世公认的理论；1887 年的迈克尔逊-莫雷实验和 19 世纪末的黑体辐射实验更促进了 20 世纪伟大的“相对论”和“量子论”的诞生。这一切都说明了物理学本质上是一门实验科学，实验是物理学的基础，物理理论离不开实验，物理理论与物理实验是相辅相成的，离开了物理实验，物理理论就成了无源之水、无本之木。

物理实验的重要作用，可简单归结为以下几条：

(1) 物理实验是提出物理理论及学说的基础，如开普勒行星运动三定律的提出。

(2) 物理实验是判断物理理论正确与否的依据，如关于光的本质研究的“杨氏双缝干涉实验”对光的波动理论的证明以及后期的光电效应和康普顿效应对光的量子理论的证明。

(3) 物理实验能够推广应用物理理论，开拓应用新领域。如电磁场理论建立之后，由各类电磁学实验产生的发明创造，如发电机、电报等推动了电气工业和通信工业的发展。

(4) 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。

综上所述，我们应该重视物理实验课程，做好物理实验，掌握最基本的实验知识和技能，掌握基本的实验分析方法和数据处理方法，为以后从事自然科学和工程技术的研究打下良好的基础。

一、物理实验课的地位、作用和任务

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，是大学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端。物理实验课覆盖了广泛的学科领域，



具有多样化的实验思想、实验方法、实验手段以及综合性很强的基本实验技能,在培养学生创新意识和创新能力,引导学生确立正确科学思想和科学方法,提高学生的科学素养以及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。

物理实验课的任务如下:

1. 培养与提高学生科学实验基本素质,确立正确的科学思想和科学方法

通过物理实验课的教学,使学生掌握测量误差及测量不确定度分析、实验数据处理的基本理论和方法,学会常用仪器的调试和使用,了解常用的实验方法,能够对常用物理量进行一般测量,具有初步的实验设计能力,同时能有效提高学生的科学实验能力,其中包括:

独立实验的能力——能够通过阅读实验教材、查询有关资料,掌握实验原理及方法,做好实验前的准备工作;正确使用仪器及辅助设备(如计算机等),独立完成实验内容,撰写合格的实验报告,逐步培养学生独立实验的能力。

分析与研究的能力——能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行判断、归纳与分析,通过实验掌握物理现象和物理规律研究的基本方法,培养学生分析与研究问题的能力。

理论联系实际的能力——能够在实验中发现、分析问题和解决问题;能够根据物理理论与实验的要求建立合理模型并完成简单的设计性实验,培养学生综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

2. 培养与提高学生的创新思维、创新意识和创新能力

通过物理实验引导学生深入观察实验现象,建立合理的模型,定量研究物理规律;使学生能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析和判断,逐步学会提出问题、分析问题和解决问题的方法;激发学生创造性思维,使其能够完成符合规范要求的设计性内容的实验,进行简单的具有研究性或创意性内容的实验。

3. 培养与提高学生的科学素养

要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风、严肃认真的工作态度、主动研究的探索精神以及遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德。

二、物理实验课的主要教学要求

1. 预习

预习是保证实验顺利进行的重要步骤,实验前学生应认真仔细阅读实验教材并查阅相关资料,了解相关仪器的构造和使用方法,对实验步骤、实验原理、实验方法以及要测量的相关物理量做到心中有数。在实验前应明确实验任务,并写出预习报告。预习报告应包括以下几项内容:

- (1) 实验名称;
- (2) 实验目的;
- (3) 实验原理(包括相关的实验方法或仪器测量原理、文字叙述及公式);
- (4) 实验步骤;

- (5) 画好原始实验数据的记录表格；
- (6) 画出与实验相关的原理图、电路图或光路图等。

2. 实验

学生必须携带预习报告和实验教材进入实验室做实验。实验时应根据实验步骤和要求，认真调试仪器，使仪器处于正常工作状态，仔细观察实验现象并测量相关的物理量，正确读取和记录数据，独立完成实验。

测量结束后要尽快整理并分析数据，以便及时发现问题，做出必要的补充测量。

实验完毕后，将数据送交教师审阅，待教师签字认可后，再拆除实验装置并将仪器及实验台整理好。

3. 撰写实验报告

实验报告是实验工作的总结，撰写实验报告是实验课的重要任务之一。合格的实验报告就是一篇模拟的科学论文，是以后进行科学实验并撰写科学论文的基础，应学会撰写简明扼要、整洁清晰、数据准确可靠并对实验结果进行简单分析的实验报告。实验报告应包括以下内容：

- (1) 实验名称和实验日期；
- (2) 实验目的；
- (3) 实验仪器(包括规格及编号)；
- (4) 实验原理(包括实验所依据的物理定律、物理公式、电路图、光路图等)；
- (5) 数据和图表(包括测量的原始数据及表格、计算结果、测量不确定度计算及结果表达式和用图表对数据的综合表述等)；
- (6) 分析讨论(包括实验的心得体会、对实验中出现的問題或者误差因素的分析、对实验装置和实验方法的改进意见)。

三、实验室规则

- (1) 学生进入实验室前，必须写好预习报告并画好原始实验数据表格，经教师检查同意后方可进行实验。
- (2) 使用电源时，需经教师检查后方可接通电源。
- (3) 爱护实验设备，不能擅自搬弄仪器，实验中严格按仪器说明书操作，损坏仪器要赔偿。
- (4) 遵守纪律，保持实验室安静。
- (5) 实验结束后，学生应将仪器整理复原，并打扫实验室卫生。
- (6) 独立完成实验及实验报告，不得伪造或抄袭数据，实验报告在实验完成后一周内送交任课教师。

第一章 测量误差、测量不确定度和实验数据处理

物理实验离不开测量，测量必须给出测量结果评定，传统上对测量结果的评定是以“误差”概念为基础的。误差定义为“测量结果减去被测量的真值”，而严格意义上的真值是无法得到的，因而严格意义上的误差也无法得到。另外，由于误差来源的随机误差和系统误差很难严格区分，在数学上也无法找到随机误差和系统误差统一的合成方法，使得各国之间以及同一国家内部的不同测量领域、不同测量人员采用的误差处理方法不一致，导致测量结果缺乏可比性。在 20 世纪 60 年代，世界各国采用测量不确定度概念来统一评价测量结果，才使得不同领域、不同国家间的测量有了可比性，便于国际科技交流。

考虑到传统误差理论使用已久，且误差理论是测定不确定度的基础，而测量不确定度是误差理论的发展，它的评定要用到误差理论中的基础知识，同时平均(绝对)误差的概念比测量不确定度的概念更容易让学生接受，因此本章由浅入深地介绍了误差理论和测量不确定度，讲解了有效位数、数据处理方法和随机变量常用分布等知识。本书在实验结果的评定上全面采用测量不确定度表示方法。

1.1 测量误差基本知识

1.1.1 测量

1. 定义

测量是物理实验的基本内容之一，其实质是将待测物体的某物理量与相应的标准做定量比较，其目的是要把所研究的量与一个数值联系起来，即测量是以确定量值为目的的一组操作，测量的结果应包括：数值(即度量的倍数)、单位(所选定的特定量)以及结果可信赖的程度(用不确定度表示)。上述三项称为测量结果表达式中的三要素。按照《中华人民共和国计量法》规定，我国采用国际单位制(SI 制)为国家法定计量单位，即以米、千克、秒、安培、开尔文、摩尔、坎德拉作为基本单位，其他量都由以上 7 个基本单位导出，称为国际单位制的导出单位，中华人民共和国法定计量单位(摘录)见本书附录 2。

2. 直接测量和间接测量

按测量方法的不同，测量可分为直接测量和间接测量两类。直接测量就是将待测量和标准量直接进行比较，或者从已用标准量校准的仪器上直接读出测量值的方法，其特点是待测量的值和量纲可直接得到。如用米尺、游标卡尺测长度，用秒表测时间，用天平称质



量,用 电 流 表 测 电 流 等 均 为 直 接 测 量,相 应 的 测 量 结 果(长 度、时 间、质 量、电 流 等)称 为 直 接 测 量 量。

间 接 测 量 就 是 通 过 测 量 与 被 测 量 有 函 数 关 系 的 其 他 量,计 算 出 被 测 量 值 的 一 种 测 量 方 法。例 如,用 单 摆 测 量 重 力 加 速 度 时,由 $T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$,可 以 先 用 米 尺 直 接 测 出 摆 线 长 度 L ,用 秒 表 测 出 振 动 周 期 T ,再 根 据 公 式 $g=\frac{4\pi^2}{T^2}L$ 求 出 重 力 加 速 度 g , g 为 间 接 测 量 量。

3. 等精度测量和不等精度测量

根 据 多 次 测 量 过 程 中 的 测 量 条 件 变 化 与 否,测 量 可 分 为 等 精 度 测 量 和 不 等 精 度 测 量。

等 精 度 测 量 是 指 在 相 同 实 验 条 件 下 对 同 一 物 理 量 所 做 的 重 复 测 量。由 于 各 次 测 量 的 实 验 条 件 相 同,各 次 测 量 结 果 的 可 靠 性 也 是 相 同 的,没 有 理 由 认 为 哪 一 次 测 量 更 精 确 或 更 可 靠,所 以 各 次 测 量 是 等 精 度 的。

若 在 重 复 测 量 过 程 中,实 验 条 件 如 测 量 人、仪 器、实 验 方 法 或 环 境 因 素 等 发 生 变 化,则 这 样 的 测 量 是 不 等 精 度 测 量。

在 实 际 测 量 过 程 中,没 有 绝 对 不 变 的 人 和 事 物,运 动 是 绝 对 的,实 验 条 件 总 是 处 于 变 化 之 中,但 只 要 其 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。若 实 验 条 件 部 分 或 全 部 发 生 明 显 变 化,显 著 影 响 实 验 结 果,则 为 不 等 精 度 测 量。本 书 中 若 不 强 调 说 明,所 指 测 量 均 为 等 精 度 测 量。

1.1.2 误差

1. 真值

测 量 的 最 终 目 的 是 要 获 得 待 测 物 理 量 的 真 值,而 真 值 是“与 给 定 的 特 定 量 的 定 义 一 致 的 值”。真 值 是 一 个 理 想 的 概 念,其 本 值 是 不 确 定 的,但 可 以 通 过 改 进 特 定 量 的 定 义、测 量 方 法 和 条 件 等,使 获 得 的 量 值 足 够 地 逼 近 真 值,满 足 实 际 使 用 测 量 值 时 的 需 要。在 实 际 测 量 中 使 用 约 定 真 值 来 代 替 真 值,约 定 真 值 可 以 是 指 定 值、最 佳 估 计 值、约 定 值、参 考 值 或 理 论 值,实 验 中 常 用 某 量 的 多 次 测 量 结 果 来 确 定 约 定 真 值,如 算 术 平 均 值 就 是 最 佳 估 计 值。

2. 误差

由 于 实 验 方 法 和 测 量 条 件 的 局 限,测 量 值 并 非 真 值,测 量 值 与 真 值 之 间 必 然 存 在 或 多 或 少 的 差 值,这 种 差 值 称 为 测 量 误 差,简 称 误 差,误 差 = 测 量 值 - 真 值。

当 误 差 与 相 对 误 差 有 区 别 时,误 差 又 称 为 绝 对 误 差,绝 对 误 差 可 正 可 负,注 意 不 要 与 误 差 的 绝 对 值 相 混 淆。绝 对 误 差 反 映 了 测 量 值 偏 离 真 值 的 大 小 和 方 向。

3. 误差分类

由 于 测 量 值 必 然 有 误 差,因 此 我 们 需 要 对 测 量 值 的 准 确 程 度 做 出 估 计,这 就 需 要 研 究 误 差 的 来 源、性 质 以 及 处 理 方 法,从 而 完 善 测 量 的 方 法,减 少 误 差。

按 照 误 差 的 特 征,可 将 测 量 的 误 差 分 为 系 统 误 差、随 机 误 差 和 粗 大 误 差 三 类:

(1) 系 统 误 差:在 重 复 性 条 件 下,对 同 一 被 测 量 进 行 无 限 多 次 测 量 所 得 结 果 的 平 均 值 与 被 测 量 的 真 值 之 差,即 $\delta = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - x_0$ 。系 统 误 差 及 其 原 因 不 能 完 全 获 知,但 其 来

源主要有以下三种：

① 方法误差：由于实验原理不完善，公式的近似性以及实验方法过于简化等原因产生的误差。如用单摆测重力加速度时，忽略了空气对摆动的阻力；用伏安法测电阻时，忽略了电表内阻的影响等。

② 仪器误差：由于仪器本身的缺陷或使用不当而产生的误差。如米尺的刻度不均匀，天平的两臂不等长，应水平放置的仪器没有水平放置等。

③ 个人误差：由于实验者本人的生理特点或不良习惯产生的误差。如用秒表测时间时，有的人习惯早按，有的人习惯迟按；观察仪表指针时，有的人习惯将头偏向一边等。

通过校准仪器、完善实验理论、改善实验条件和测量方法，可以将系统误差减小到允许的程度。但增加测量次数并不能减小系统误差。

(2) 随机误差：测量结果与在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值之差，即 $\delta_i = x_i - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。随机误差来源于影响量的变化，这种变化在时间上和空间上是不可预知的或随机的，它会引起被测量重复观测值的变化。就单个随机误差而言，它没有确定的规律，但就整体而言，随机误差却服从一定的统计规律，故可用统计方法估计其界限或它对测量结果的影响。增加测量次数，可减小随机误差。

服从正态分布的随机误差具有以下四大特征：

- ① 单峰性：绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。
- ② 对称性：绝对值相等的正负误差出现的概率相等。
- ③ 有界性：误差的绝对值不会超过一定的界限，即不会出现绝对值很大的误差。
- ④ 抵偿性：随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋向于零，即

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \delta_i = 0$$

随机误差主要有以下三种来源：

① 判断性误差：实验者在对准目标(刻线等)、确定平衡(如天平)、估计读数时而产生的误差。

② 实验条件的起伏：如电源电压的波动，环境温度、湿度的变化等产生的误差。

③ 微小干扰：如振动、空气流动、外界电磁场干扰的影响等产生的误差。

由于测量次数有限，实验中可确定的系统误差和随机误差分别是系统误差的估计值和随机误差的估计值。

(3) 粗大误差：明显地与事实不符的误差。它是由于测量者粗心大意，或者实验条件突变、仪器在非正常状态下工作、无意识的不正确操作等因素造成的。含有粗大误差的测量值称为可疑值。在没有充分依据的前提下，可疑值绝不能随意去除，应按照一定的统计准则予以剔除。

4. 测量的精密度、正确度和精确度

通常系统误差和随机误差是混在一起出现的，有时也难以区分。在科学实验中，常用“精密度”表示随机误差的大小，反映测量结果的分散性，即测量值 x_i 偏离均值 \bar{x} 的程度；用“正确度”表示系统误差的大小，反映 \bar{x} 接近真值 x_0 的程度；用“精确度”综合反映随机误差和系统误差的大小。如图 1.1-1 的(a)、(b)、(c)三张打靶图，圆心为目标，黑点为弹



着点, (a)图表示射击的精密度高, 即分散性小, 但弹着点均值偏离目标较大, 即随机误差小而系统误差大; (b)图比(a)图系统误差小, 但随机误差大, 即精密度低而正确度高; (c)图弹着点比较集中且又聚集在靶心, 表示精确度高, 即精密度高、正确度也高。

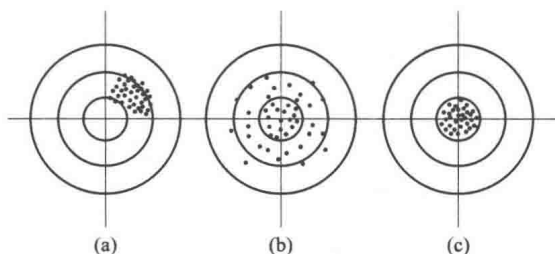


图 1.1-1 三种测量结果分布示意图

5. 测量误差的表示

实验中, 常用绝对误差、相对误差、百分误差表示测量结果的优劣。由于真值无法得到, 常用多次测量的算术平均值 \bar{x} 替代真值。测量值与算术平均值之差称为残差。即

$$v_i = x_i - \bar{x}$$

(1) 绝对误差: 测量值减去被测量的真值。即

$$\text{绝对误差 } \Delta x = | \text{测量值 } x - \text{真值 } x_0 |$$

(2) 相对误差: 测量误差与被测量真值之比。即

$$\text{相对误差 } E = \frac{\text{测量误差}}{\text{真值}} \times 100\%$$

(3) 百分误差: 有时将测量值与理论值或公认值进行比较, 用百分误差 E_r 表示

$$E_r = \frac{| \text{测量值} - \text{理论值} |}{\text{理论值}} \times 100\%$$

当两个被测量的值大小相近时, 通常用绝对误差比较测量结果的优劣; 当两个被测量值相差较大时, 用相对误差才能进行有效比较。如测量标称值分别为 9.8 mm 和 99.8 mm 的甲、乙两物体的长度, 实测值分别为 10.0 mm 和 100.0 mm, 两者的绝对误差都为 +0.2 mm, 无法用绝对误差比较两者的测量水平, 而用相对误差表示时, 甲为 2%, 乙为 0.2%, 所以乙测量结果比甲准确, 乙比甲的测量水平高出一个数量级。

1.1.3 随机误差的估算

1. 多次等精度直接测量误差及测量结果表示

(1) 算术平均值: 设对物理量 x 进行了 n 次测量, 各次测量值分别为 x_1, x_2, \dots, x_n ,

则算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 可以证明, 算术平均值即是该物理量的最佳估计值。

(2) 平均误差(或平均绝对误差): 各次测量值的残差 $v_i = x_i - \bar{x}$, $i=1, 2, \dots, n$, 各残差绝对值的算术平均值称为平均(绝对)误差:

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |v_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|$$

当测量次数少, 测量仪表准确度不高时或数据离散性不大时, 可用平均(绝对)误差估算随机误差。

用平均(绝对)误差表示的测量结果为

$$\begin{cases} x = \bar{x} \pm \overline{\Delta x} \\ E = \frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}} \times 100\% \end{cases}$$

根据高斯误差理论, 上式表示物理量 x 的真值落在 $(\bar{x} - \overline{\Delta x}, \bar{x} + \overline{\Delta x})$ 内的概率是 57.5%。

例 1.1.1 用米尺测量一铜棒的长度, 共测量 5 次, 各次的测量值为 $L_1 = 23.2 \text{ mm}$, $L_2 = 23.2 \text{ mm}$, $L_3 = 23.3 \text{ mm}$, $L_4 = 23.1 \text{ mm}$, $L_5 = 23.1 \text{ mm}$, 试写出测量结果的表达式。

解 ① 算术平均值:

$$\bar{L} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 L_i = 23.2 \text{ mm}$$

② 平均绝对误差:

$$\overline{\Delta L} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 |L_i - \bar{L}| = 0.06 \text{ mm} \approx 0.1 \text{ mm}$$

米尺的最小分度值为 1 mm, 所以我们只能估读出 0.1 mm。当平均绝对误差小于仪器的估读数时, 平均绝对误差一般取仪器的估读数。

③ 相对误差:

$$E = \frac{\overline{\Delta L}}{\bar{L}} \times 100\% = \frac{0.1}{23.2} \times 100\% = 0.4\%$$

④ 测量结果:

$$\begin{cases} L = (23.2 \pm 0.1) \text{ mm} \\ E = 0.4\% \end{cases}$$

它表示铜棒长度的真值落在 23.1~23.3 mm 范围内的可能性是 57.4%。

(3) 标准误差: 在物理实验和科技论文中, 更常用的是用标准误差来计算测量列随机误差的大小, 因为标准误差更符合随机误差的正态分布理论, 显然标准误差的计算比绝对误差的计算复杂。标准误差的数学表达式为 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}$ ($n \rightarrow \infty$), x_0 为真值。

而实际的测量次数都是有限的, 实际计算时, 用 \bar{x} 代替真值 x_0 , 则标准误差 σ 的估计

值为: $S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$, 称为标准偏差。此式称为贝塞尔公式。

用数学知识可以证明算术平均值 \bar{x} 的标准偏差 S_x 是测量列标准偏差 S 的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 倍, 即

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

表明多次测量可以减小随机误差, 测量次数一般用 6~10 次。

用标准偏差表示的结果为

$$\begin{cases} x = \bar{x} \pm S_x \\ E = \frac{S_x}{\bar{x}} \times 100\% \end{cases}$$

按照随机误差的统计理论，上式表示测量列中任一测量值的误差落在区间 $(-S_x, +S_x)$ 内的概率是 68.3%，物理量的真值落在 $(\bar{x}-S_x, \bar{x}+S_x)$ 内的概率也是 68.3%。

若误差取标准误差的 3 倍即 3σ ，则测量列中任一测量值的误差落在区间 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 内的概率是 99.7%，落在这区间外的概率只有 0.3%，所以误差实际上不会超过此区间，因此称 3σ 为极限误差，用 Δ 表示，即 $\Delta=3\sigma$ 。误差大于 3σ 的测量值可以认为是错误的，一般可以舍去，称为 3σ 准则。但 3σ 准则是以测量次数充分大为前提的，在测量次数较少时，不宜用此准则，只有测量次数 $n>50$ 时才适用。

例 1.1.2 测量某物体的长度，共测 9 次，各次测量值分别为 23.2 mm, 23.4 mm, 23.6 mm, 23.0 mm, 23.7 mm, 23.2 mm, 23.6 mm, 23.0 mm, 23.7 mm，试用标准误差表示测量结果。

解 测量值及计算结果(见表 1.1-1)如下。

① 算术平均值：

$$\bar{L} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 L_i = 23.4(\text{mm})$$

② 测量列标准偏差：

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2} = \sqrt{\frac{0.66}{9-1}} = 0.29(\text{mm})$$

③ 算术平均值的标准偏差：

$$S_L = \frac{1}{\sqrt{n}} S = \frac{0.29}{\sqrt{9}} = 0.1(\text{mm})$$

④ 相对误差：

$$E = \frac{S_L}{L} \times 100\% = \frac{0.1}{23.4} \times 100\% = 0.4\%$$

⑤ 测量结果：

$$\begin{cases} L = (23.4 \pm 0.1)\text{mm} \\ E = 0.4\% \end{cases}$$

表 1.1-1 测量值及计算结果

测量次数	L_i/mm	$(L_i - \bar{L})/\text{mm}$	$(L_i - \bar{L})^2/\text{mm}^2$
1	23.2	-0.2	0.04
2	23.4	0.0	0.00
3	23.6	0.2	0.04
4	23.0	-0.4	0.16
5	23.7	0.3	0.09
6	23.2	-0.2	0.04
7	23.6	0.2	0.04
8	23.0	-0.4	0.16
9	23.7	0.3	0.09