

● 普通高等教育“十三五”规划教材

# 大学物理实验

主 编 李密丹 杨少波

副主编 张明长 吴魏霞 张春梅 张 翱 孟 涛

非  
外  
借



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十三五”规划教材

# 大学物理实验

主 编 李密丹 杨少波

副主编 张明长 吴魏霞 张春梅 张 翱 孟 涛



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

## 内 容 提 要

本书依据教育部物理基础课程教学分委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年),结合北京印刷学院物理实验教学中心多年来的教学实践和改革经验,借鉴国内外近年来物理实验教学研究成果编写而成。在内容安排上尽量由浅入深,循序渐进。全书由绪论、实验理论和基本实验方法、实验项目组成。考虑到分层次教学的要求,将实验项目按基本实验、基础实验、综合性和应用性实验、设计性实验四个层次编排,共收入了36个实验项目。同时,本书结合北京印刷学院的行业特点,增设了部分与印刷专业相关的针对性强的实验项目。

本书可作为高等院校工科类专业的物理实验教学用书,也可供相关读者参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 李密丹, 杨少波主编. -- 北京 :  
中国水利水电出版社, 2019.2  
普通高等教育“十三五”规划教材  
ISBN 978-7-5170-7468-7

I. ①大… II. ①李… ②杨… 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031158号

策划编辑: 周益丹

责任编辑: 张玉玲

封面设计: 李 佳

书 名	普通高等教育“十三五”规划教材 大学物理实验 DAXUE WULI SHIYAN
作 者	主 编 李密丹 杨少波 副主编 张明长 吴魏霞 张春梅 张 翱 孟 涛
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13.75印张 334千字
版 次	2019年2月第1版 2019年2月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	36.00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

# 前 言

物理学本质上是一门实验学科。物理实验是科学实验的基础，具有大多数科学实验的共性，其实验思想、实验方法和实验手段目前已广泛地应用于科学技术的各个领域。大学物理实验课是高等院校理工学生接受科学实验训练的必修基础课程，在培养学生科学实验能力和创新能力、提高科学素质等方面具有不可替代的作用。该课程在向学生传授物理实验基础知识的同时，更注重培养学生养成良好的实验习惯和严谨的科学作风，为今后的学习和工作奠定坚实的基础。

本书依据教育部物理基础课程教学分委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》（2010年），结合北京印刷学院物理实验教学中心多年来的教学实践和改革经验，在《大学物理实验》（2005年，李密丹等主编）的基础上重新编写而成。本书在内容安排上尽量由浅入深，循序渐进。全书由绪论、实验理论和基本实验方法、实验项目组成。考虑到分层次教学的要求，将实验项目按基本实验、基础实验、综合性和应用性实验、设计性实验四个层次编排。绪论介绍物理实验课的目的和任务、主要环节以及实验守则和实验安全。第1章和第2章详细阐述了测量与误差的基本知识、处理实验数据的一些常用方法，以及物理实验中常用的基本测量方法和实验室常用仪器的构造、性能、使用方法。第3章为基本实验，是入门性实验，为那些基础薄弱的学生开设，设置了4个实验项目，学生通过基本实验的学习，掌握最基本物理量的测量、最基本仪器的使用，并逐渐熟悉物理实验课程的基本程序和学习方法，同时养成良好的实验习惯，为后续实验打下坚实的基础。第4章为基础实验，按力学、热学、电磁学、光学设置了13个实验项目，以基本物理知识、基本实验操作技术和基本实验方法训练为主，培养学生独立实验的能力。第5章为综合性与应用性实验，设置了9个实验项目，目的是巩固学生的学习成果，提高学生对实验方法和实验技术的综合运用能力；同时结合我校专业特点，在物理实验课程中引进现代科学技术，如传感器技术、光电子技术、色彩学技术等，开阔学生的眼界和思路。第6章为设计性实验，设置了10个实验项目，学生根据给定的实验题目、要求和条件，自己设计方案并独立完成实验，目的是激发学生的学习主动性，培养学生的创新能力和初步的科学研究能力。本书在编写过程中充分考虑到开放式教学要求，各层次实验项目相互联系又相对独立，学生可以根据自己的能力、兴趣和专业特点选做。

本书是北京印刷学院物理实验教学中心全体教师和实验技术人员集体的智慧和劳动的结晶。同时，本书在编写过程中，参考了许多兄弟院校的教材和教学仪器厂家提供的资料，在此一并表示衷心感谢。

由于编者的水平有限，加之编写时间仓促，难免有不足之处，恳请读者批评指正。

编 者  
2018年9月

# 目 录

前言	
绪论	1
0.1 大学物理实验课的目的和任务	1
0.2 大学物理实验课程的主要环节	2
0.3 实验守则	3
0.4 实验安全	3
第1章 实验误差和数据处理基础知识	5
1.1 测量与误差的基本概念	5
1.1.1 测量	5
1.1.2 真值、测量值和测量误差	5
1.1.3 测量误差的分类	6
1.1.4 测量精度	9
1.2 测量结果表示与不确定度计算	9
1.2.1 不确定度的分类	9
1.2.2 不确定度计算	10
1.3 有效数字及其运算规则	14
1.3.1 有效数字的概念	14
1.3.2 有效数字的读数规则	14
1.3.3 有效数字的书写方法	15
1.3.4 有效数字的运算规则	15
1.4 实验数据处理的基本方法	16
1.4.1 列表法	16
1.4.2 作图法	16
1.4.3 逐差法	19
1.4.4 最小二乘法(线性回归)	20
习题	24
第2章 物理实验基本测量方法和常用仪器	26
2.1 物理实验中常用的基本测量方法	26
2.1.1 比较法	26
2.1.2 放大法	26
2.1.3 转换测量法	28
2.1.4 模拟法	32
2.2 物理实验常用仪器	33
2.2.1 力学实验常用仪器	33
2.2.2 电学实验常用仪器	40
2.2.3 光学实验常用仪器	47
第3章 基本实验	51
实验 3.1 力学基本测量——长度和物体密度的测定	51
实验 3.2 电学基本测量——电学元件伏安特性的测量	53
实验 3.3 光学基本实验——薄透镜焦距的测定	57
实验 3.4 示波器的使用	61
第4章 基础实验	72
力学与热学实验	72
实验 4.1 测定刚体转动惯量	72
实验 4.2 拉脱法测量液体表面张力系数	76
实验 4.3 非良导体热导率的测定	80
电磁学实验	85
实验 4.4 电表的改装与校正	85
实验 4.5 用惠斯登电桥测电阻	89
实验 4.6 晶体三极管输入输出特性	95
实验 4.7 动态磁滞回线的测绘	101
实验 4.8 用霍尔元件测磁场	106
光学实验	112
实验 4.9 迈克尔逊干涉仪及其应用	112
实验 4.10 光的等厚干涉	119
实验 4.11 光栅衍射实验	125
实验 4.12 用分光计测折射率	133
实验 4.13 偏振光实验	137
第5章 综合性与应用性实验	143
实验 5.1 动态法测金属杨氏模量	143
实验 5.2 声速的测定	147
实验 5.3 非线性电路混沌实验	151

实验 5.4 夫兰克-赫兹实验	157	实验 6.4 毛细管法研究水溶液的表面张力系数	200
实验 5.5 全息照相技术	163	实验 6.5 位相体全息图的制作	201
实验 5.6 色度实验	168	实验 6.6 用迈克尔逊干涉仪测透明薄介质折射率	202
实验 5.7 音频信号光纤传输实验	171	实验 6.7 全息光栅的制作	203
实验 5.8 太阳能电池特性测量	177	实验 6.8 白光全息防伪图的制作	203
实验 5.9 传感器系列实验	182	实验 6.9 迈克尔逊干涉实验成像系统设计	204
第 6 章 设计性实验	192	实验 6.10 标准色块彩色还原色域研究	205
设计性实验导言	192	附录 物理学常用数据表	207
实验 6.1 多用表的设计制作	193	参考文献	211
实验 6.2 用光学方法测金属杨氏模量	194		
实验 6.3 R-C 四端网络	194		

# 绪 论

物理 (physics) 一词源于希腊文, 意为自然规律。物理学是研究物质运动最一般规律和物质基本结构的学科, 是自然科学的基础, 物理学不仅推动了整个自然科学的发展, 而且对人类的物质观、时空观、宇宙观乃至人类文化都产生了深刻的影响。物理学是当代科学技术发展最主要的源泉, 其理论与实验的发展常常成为自然科学研究和工程技术创新发展的生长点。

物理学是在实验与理论紧密相互作用的基础上发展起来的, 理论进展的基础在于理论能够解释现有的实验事实, 并且还能够预言可以由实验证实的新现象。当物理学中发现一个新的实验结果时, 就会发生物理学的革命, 并且导致新理论的产生, 例如  $K$  介子衰变中电荷共轭宇称与宇称复合对称性不守恒的发现、 $J$  粒子的发现, 以及高温超导体的发现, 开辟了物理学中新的研究领域, 但这些实验发现都是预先在理论上并没有兴趣的情况下作出的。又如高能加速器实验近年来作出的有关粒子物理的基本发现, 除  $W$  粒子和  $Z$  粒子外, 几乎都是在加速器开始建造时未曾预言过的。没有一个理论能够驳斥实验的结果, 反之, 如果一个理论与实验观察的事实不符合, 那么这个理论就不能存在。爱因斯坦曾说: “一个美妙的实验, 通常要比我们头脑中提取的 20 个公式更有价值。”

大学物理实验是高等院校独立设置的一门基础实验课程。大学物理实验课知识覆盖面广, 具有丰富的实验思想、方法和手段, 能提供系统、全面、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、提高科学素养的重要基础。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应用能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。因此, 学好大学物理实验课对于高等院校的学生来说是十分重要的。

## 0.1 大学物理实验课的目的和任务

大学物理实验课是对学生进行实验教育的入门课程, 其教学目的在于让学生在学物理实验基础知识的同时, 接受严格的科学训练, 具备基本的科学实验能力, 并在学习过程中养成良好的实验习惯和培养严谨的科学作风, 为今后的学习和工作奠定良好的基础。其具体任务如下所述。

### 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、基础方法和基本技能; 懂得如何应用实验原理和方法去研究问题; 熟悉常用仪器的基本原理、结构性能及使用方法。

### 2. 培养和提高学生的科学实验能力

(1) 自学能力。通过自行阅读实验教材和参考资料, 正确理解实验原理和实验内容, 作好实验前的准备。

(2) 动手能力。借助教材或说明书正确调整和使用常用仪器; 能够排除实验中的简单故障; 在给定的实验条件下, 得到尽可能好的实验结果。

(3) 分析能力。运用物理学理论对实验现象和实验结果进行初步分析、判断和解释；对各种因素可能引起的误差进行初步估计。

(4) 表达能力。正确记录和处理实验数据，设计表格，绘制曲线，描述实验现象，说明分析实验结果，撰写合格的实验报告。

(5) 设计能力。根据研究对象或课题要求，设计实验方案，确定实验条件，合理选择实验仪器，拟定具体的实验步骤。

(6) 创新能力。通过开设设计性实验、创新性实验，让学生在实践中体会创新过程，培养创新意识。

### 3. 培养与提高学生的科学实验素养

培养学生实事求是的科学作风、严肃认真的工作态度、主动进取的探索精神、相互协作的团队意识和爱护公物的优良品质，为学生以后的发展奠定良好的基础，让学生终身收益。

## 0.2 大学物理实验课程的主要环节

### 1. 实验预习

这是进行物理实验的首要步骤。实验课前必须认真预习，不预习或预习不合格者不得进行实验操作。实验预习包括以下内容：

(1) 仔细阅读教材，明确实验目的，弄清实验原理，了解实验仪器、内容、步骤、测量方法和注意事项等。也可以利用实验室开放时间到实验室对照仪器预习。

(2) 用专用实验报告纸撰写实验预习报告。预习报告应包含以下内容：

1) 填写实验报告纸中班级、姓名，写明实验题目、实验目的、主要仪器，阐述实验原理（包括原理图、公式等），写明操作要点，回答预习题。

2) 设计并画好原始数据记录表格，数据表格要力求体现测量数据的特点，简单明了。

(3) 课上教师采用全查、抽查、课堂提问、讨论等方式，检查预习情况，并记录预习成绩。

### 2. 实验操作

实验操作是进行大学物理实验的中心环节，主要包括实验准备、调整仪器、正式观测、仪器还原等。具体步骤如下：

(1) 实验准备。

1) 学生必须按时进入实验室，按学号和仪器号“对号入座”；签到并填写实验日志记录（仪器使用及维护情况记录）；凭证领取实验仪器。

2) 严格遵守教师要求，认真听取教师讲解；熟悉实验内容及实验目的；对照实验设备，弄清实验仪器构造、原理及其使用方法。

(2) 调整仪器。严格按实验内容与步骤，连接、调试仪器，观察现象。

1) 仔细检查、确认实验仪器原始状态是否完好，如有问题及时报告老师或实验管理人员。

2) 严格按照实验步骤，安装、连接线路，调试仪器，达到正常使用状态。

3) 按照实验原理、方法、内容及步骤，逐步逐项进行实验操作。电磁学实验，线路连接完成之后须经教师检查方可接通电源进行实验。

(3) 正式观测。

做实验时，应根据实验步骤和要求，认真调试仪器，仔细观察和测量，按有效数字要求



如实地记录测量数据。

1) 数据记录。测量并记录实验数据,同时将实验数据记录在原始数据记录表格中。原始数据记录务必注意有效数字的位数和单位。

2) 数据审查。测量记录完毕,应将测量数据记录交给教师审阅,不合理的数据,未经重新测试,不允许随意修改。任课教师确认数据合格后签字,教师签字后该次实验才有效。下次实验时将原始实验数据附于正式实验报告后面,一并上交。

3) 实验完毕,实验数据经教师认可后,将仪器整理好,交还所借的器具。

(4) 仪器还原。将所用仪器设备和桌椅整理、复原。如关闭电源、拆卸线路,恢复原始状态后方可离开实验室。值日生留下清扫实验室。

### 3. 实验报告撰写

正确处理实验数据并撰写出完整的实验报告,是物理实验课程训练的重要内容之一。实验报告是对实验工作的总结,即在对实验原始数据处理后,对所做实验进行的全面分析和最终总结。

1) 实验报告要用专用实验报告纸书写。

2) 对数据进行整理,将原始数据列入标准的数据表格中,然后进行必要的计算和误差分析,得出测量的结果并对结果进行分析,回答教材中的思考题。

3) 报告要求独立完成,努力做到字迹端正、文句通顺、记录整洁、图表清晰、结果合理。本着严谨、准确、求实的原则努力完成每一个实验报告。

## 0.3 实验守则

1. 在实验室规定的范围内,实验内容和实验时间可在网上自行选择。选定后即占用了实验室资源,不得随意调整,严格按照选定的实验内容及时间上课。

2. 设计性实验2人一组,自行组队,在6学时(分2次)内完成,实验结果形式可以是口头答辩、小论文或实验报告。

3. 学生进入实验室须带上预习报告,经教师检查同意方可进行实验。

4. 遵守课堂纪律,保持安静的实验环境。

5. 使用电源时,务必经过教师检查线路后方可接通电源。

6. 爱护仪器,进入实验室不能擅自搬弄仪器,实验中严格按仪器说明书操作。如有损坏,照章赔偿。

7. 实验完毕,要将仪器整理还原、将桌面和凳子收拾整齐。经教师审查测量数据并签字后,归还仪器,方可离开。

8. 实验报告应在实验后的下次课上交任课教师。

## 0.4 实验安全

进行实验,首先确保安全第一!必须严格遵守实验室各项管理、安全、卫生规章制度。

实验前必须做好周密的准备,不仅要对所用的实验装置及药品等进行认真检查,还必须按照实验要求做好充分的准备工作;严格遵照教师指导进行实验,决不可随意蛮干;要时刻估计到实验的危险性,并有相应的预防措施。

## 电学实验操作注意事项

### 1. 安全用电，注意人身安全和仪器的安全。

电学实验许多仪表都很精密，实验中既要完成测试任务，又要注意人身安全和仪器的安全，接、拆线路时应先关闭电源，测试中不要触摸仪器的高压带电部位。

### 2. 正确接线，实验完毕整理复原仪器。

根据电路图，按回路法逐个回路接线，每个回路一般都按由高电位到低电位的顺序接线；注意利用等位点，一个接线端上的接线尽量不要超过2根；注意电表正负极；电子仪器“ $\perp$ ”端要接到一个端子上，以防杂乱信号影响。

接线完毕后，请老师检查线路，确认无误后，开始实验。首先将各种器件都置于正常使用状态，如电源及分压器的电压置于最小位置，限流器电阻置于最大位置处，电表选择适当挡位，电阻箱的电阻不能为零等。然后接通电路测试，接通电路的顺序为：先接通电源，再接通测试仪器；断电时顺序相反，其目的是以防电源通或断时因含有感性元件产生瞬间高压损坏仪器。

实验完成后，先切断电源，再拆除线路，整理和复原仪器，置于保护状态（如电源输出置于零位，灵敏检流计开关置于短路挡）。

## 光学实验操作注意事项

光学仪器是精密仪器，有些仪器结构复杂，操作时动作要轻缓，用力均匀平稳。大部分光学元件是特种玻璃经过精密加工制成（如三棱镜），表面光洁，平时应注意防尘，有些表面有均匀镀膜（如平面反射镜），要防止磕碰、擦划和污损表面。若发现表面不洁，须用镜头纸，或无水乙醇、乙醚来处理。

暗房各种工作器具、药品要按固定位置摆放，以防用错。

了解各种光源性能，正确使用。不要直视高亮度的光源，特别是激光，不要用眼睛正视，以免灼伤眼睛。

# 第1章 实验误差和数据处理基础知识

## 1.1 测量与误差的基本概念

在物理实验中，总要进行大量的测量工作。测量包含两个必要的过程：一是对许多物理量进行检测；二是对测量的数据进行处理。在实验前，必须对所观测的对象进行分析研究，以确定实验方法和选择具有适当精度的测量仪器。在实验后，对测得的数据加以整理、归纳，用一定的方式（列表、图解等）表示出它们之间的相互关系，并对实验结果给予合理的解释，作出正确判断。

测量值和被测量的真值之间不可避免地存在着差异，这种差异的数值表现即为误差。误差存在于一切科学实验与测量过程之中，没有误差的测量结果是不存在的。随着科学技术水平的不断提高，测量误差可以控制得越来越小，但却永远不会降低到零。因此，误差是反映测量结果好坏的最直接判据，正确、合理地处理测量数据，减少、控制和评定实验误差，是判定和改善测量结果的基础。

### 1.1.1 测量

为确定待测物理量的量值而进行的实验过程称为测量。

#### 1. 直接测量和间接测量

物理实验中的测量分为直接测量和间接测量两类。直接用计量仪器读出待测量值的测量称为直接测量。例如，用米尺测出某物体的长度，用电流表测出某回路的电流强度等。依据待测量和几个直接测量量的函数关系，求出待测量的测量称为间接测量。例如，测量圆柱体的密度，须先直接测出它的高度  $h$ 、直径  $d$ 、和质量  $M$  后，再推算出密度。用这样的方法求出的物理量称为间接测量量。

#### 2. 等精度测量和不等精度测量

对某一物理量进行多次测量，如果每次测量都是在相同的条件下进行的，则称为等精度测量。相同条件的含义，是指同一个人，用同一台仪器，每次测量的周围条件都相同（如测量时环境、气温、照明情况等未变动）。反之，如果每次测量的条件不同，或测量仪器改变，或测量方法改变，这样进行的一系列测量叫作不等精度测量。

### 1.1.2 真值、测量值和测量误差

**真值：**待测物理量客观上所具有的真实数值。

**测量值：**直接或间接测量的待测物理量的量值。

**测量误差：**被测量的测量值与被测量的真值之差。测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。

由于测量仪器、方法、条件及测量人员本身等方面的原因，任何一个测量值都毫无例外

地存在误差。所以真值是一个理想概念，一般来说是无法通过测量获得的。理论证明，对有限次测量，应当用多次测量的算术平均值作为真值的最佳估计值，称作近似真值。

### 1.1.3 测量误差的分类

误差主要来源于仪器、环境、人员、方法等。为了便于分析，根据误差的性质把它们归纳为系统误差和随机误差两大类。

#### 1. 系统误差

在同一条件下，多次测量同一量值时，绝对值和符号保持恒定或按一定规律变化的误差称为系统误差。

(1) 系统误差的来源。系统误差是由固定不变的或按确定规律变化的因素所造成的，这些误差一般是是可以掌握的。从大学物理实验教学角度分析，系统误差来源主要有：

1) 仪器误差：由于仪器本身缺陷或使用条件不当造成的。如仪器的零点不准、刻度不准、仪器未校正、仪器机构误差、螺距回程差等。

2) 附加误差：由于实验环境条件变化引起的。如温度、湿度等环境变化。

3) 理论（方法）误差：由于测量原理或计算公式采用了近似，或测量方法不完善等造成的。如用伏安法测电阻没有考虑电表内阻的影响。

4) 人员误差：由于测量者生理或心理习惯造成的。如左右手习惯不同、远近和色彩视力差异等，导致读数偏大或偏小。

(2) 系统误差服从的规律。根据系统误差产生的原因可以确定它不具有抵偿性，它是固定的或服从一定的规律。

(3) 系统误差的发现。提高测量精度，首要问题是发现系统误差，然而在测量过程中形成系统误差的因素是复杂的，目前还没有能够适用于发现各种系统误差的普遍方法，只有根据具体测量过程和测量仪器进行全面的仔细分析，针对不同情况合理选择一种或几种方法加以校验，才能最终确定有无系统误差。可通过实验对比法、理论分析法、数据分析法等常用方法发现某些系统误差。

(4) 系统误差的减小和消除。在实际测量中，如果判断出有系统误差存在，就必须进一步分析可能产生系统误差的因素，想方设法减小和消除系统误差，或者对测量结果进行修正。由于测量方法、测量对象、测量环境及测量人员不尽相同，因而没有一个普遍适用的方法来减小或消除系统误差。下面简单介绍几种常用的方法和途径。

1) 从产生系统误差的根源上消除。从产生系统误差的根源上消除误差是最根本的方法，通过对实验过程中的各个环节进行认真仔细分析，发现产生系统误差的各种因素。可以从下面几个方面采取措施从根源上消除或减小误差：采用近似性较好又比较切合实际的理论公式，尽可能满足理论公式所要求的实验条件；选用能满足测量误差所要求的实验仪器装置，严格保证仪器设备所要求的测量条件（采用多人合作，重复实验的方法）。

2) 引入修正项消除系统误差。通过预先对仪器设备的分析研究，将可能产生的系统误差进行分析计算，找出误差规律，从而找出修正公式或修正值，对测量结果进行修正。

3) 采用能消除系统误差的方法进行测量。对于某种固定的或有规律变化的系统误差，可以采用交换法、抵消法、补偿法、对称测量法、半周期偶数次测量法等特殊方法进行清除。至于采用什么方法要根据具体的实验情况及实验者的经验来决定。

无论采用哪种方法都不可能完全消除系统误差，只要将系统误差减小到测量误差要求允许的范围内，或者系统误差对测量结果的影响小到可以忽略不计的程度，就可以认为系统误差已被消除。

## 2. 随机误差

随机误差是指在同一被测量的多次测量过程中，测量误差的绝对值与符号以不可预知（随机）的方式变化并具有抵偿性的测量误差分量。

(1) 随机误差的来源。随机误差是实验中各种因素的微小变动引起的。例如实验周围环境或操作条件的微小波动，测量对象的自身变化，测量仪器指示数值的变动性，以及观测者本人在判断和估计读数上的变动性等。这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量平均值发生有起伏的变化，这种变化量就是各次测量的随机误差。可见随机误差的来源是非常复杂而且是难以确定的。因而我们不能像处理系统误差那样去查出产生随机误差的原因，然后通过一定的方法予以修正或消除。

(2) 随机误差的统计分布规律。如同处理大量分子做无规则运动时，难以确定每个分子的具体运动规律，但大量的分子运动却表现出统计学的规律一样，我们发现，就某一测量值的随机误差来说是没有规律的，其大小和方向都是不可能预知的。但对某一量进行足够多次的测量，则会发现其随机误差服从一定的统计规律。误差理论和实践证明，在多数情况下，随机误差服从正态分布。

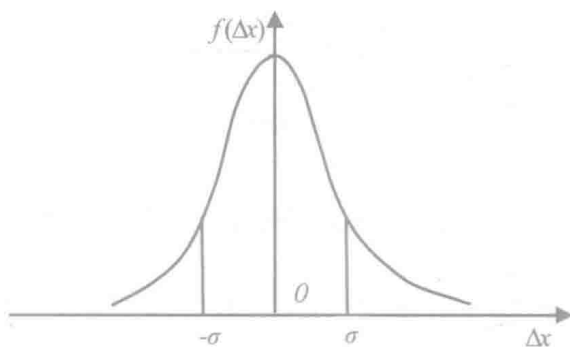


图 1.1.1 随机误差的正态分布曲线

图 1.1.1 所示为随机误差的正态分布图。横坐标表示随机误差  $\Delta x$ ，纵坐标表示对应的随机误差出现的概率密度函数  $f(\Delta x)$ ，这个函数由德国数学家和理论物理学家高斯于 1795 年导出，因而称为高斯分布函数：

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

其中

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta x_i^2}{n}}$$

式中： $\sigma$  为标准差； $n$  为测量次数。

$\sigma$  与各测量值的误差  $\Delta x_i$  具有完全不同的含义。 $\Delta x_i$  表示测量值与真值的差，是一个实在的误差，也称真误差；而  $\sigma$  并不是一个具体的测量误差值，它反映在相同条件下进行一组测

量后的随机误差出现概率的分布情况,只具有统计性质的意义,是一个统计性的特征量。

$\sigma$  表示的概率意义可以从  $f(\Delta x)$  函数式求出。由概率论可知,随机误差落在  $(\Delta x, \Delta x + d\Delta x)$  区间内的概率为  $f(\Delta x)d\Delta x$ , 所以误差出现在  $(-\sigma, +\sigma)$  区间内的概率  $P$  就是图 1.1.1 中该区间内  $f(\Delta x)$  曲线下的面积:

$$P(-\sigma < \Delta x < +\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\Delta x)d\Delta x = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-1}^{1} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = 0.6827 \approx 68.3\%$$

因此,  $\sigma$  所表示的意义就是:做任何一次测量,测量误差落在  $-\sigma$  到  $+\sigma$  之间的概率为 68.3%。

$\sigma$  并不是一个具体的测量误差值,它提供了一个用概率来表达测量误差的方法。 $[-\sigma, +\sigma]$  称为置信区间,其相应的概率  $P(\sigma) = 68.3\%$  称为置信概率。显然,置信区间扩大,则置信概率提高。置信区间取  $[-2\sigma, +2\sigma]$ 、 $[-3\sigma, +3\sigma]$ , 相应的置信概率分别为  $P(2\sigma) = 95.4\%$ ,  $P(3\sigma) = 99.7\%$ 。

服从正态分布的随机误差具有以下几个特征:

- 1) 单峰性:测量值与真值相差愈小,这种测量值(或误差)出现的概率(可能性)愈大,与真值相差大的,则概率愈小。
- 2) 对称性:绝对值相等、符号相反的正、负误差出现的概率相等。
- 3) 有界性:绝对值很大的误差出现的概率趋近于零。也即是说,总可以找到这样一个误差限,某次测量的误差超过此限值的概率小到可以忽略不计的地步。
- 4) 抵偿性:随机误差的算术平均值随测量次数的增加而越来越趋向于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0$$

(3) 随机误差的估算。假定对某一物理量在测量条件相同的情况下,进行  $n$  次无明显系统误差的独立测量,测得  $n$  个测量值为  $x_1, x_2, x_3 \cdots x_n$ , 往往称此为一个测量列。在进行随机误差估算时,算术平均值和标准偏差是两个重要的特征量,可以利用正态分布理论的一些结论来进行处理:

- 1) 算术平均值。当系统误差已被消除时,测量值的算术平均值最接近被测量的真值,测量次数越多,接近程度越好(当  $n \rightarrow \infty$  时,平均值趋近于真值),因此我们用算术平均值  $\bar{x}$  表示测量结果的最佳值。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$$

- 2) 标准偏差。测量列的随机误差用标准偏差来估算。理论证明有限次测量列中某一次测量结果的标准偏差为

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n-1}} \quad (1.1)$$

其中

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (i=1, 2, 3, \cdots n)$$

$\Delta x_i$  为每一次测量值  $x_i$  与平均值  $\bar{x}$  之差,称为偏差。显然,这些偏差有正有负,有大有小,不能全面体现一列测量值的离散性。因此,常用“方均根”法对它们进行统计,于是得到上述称为标准偏差的统计公式,这个公式(1.1)又称为贝塞尔公式。它所表示的物理意义是,如果多次测量的随机误差遵从正态分布,那么任意一次测量,测量值误差落在  $-S_x$  到  $+S_x$  之间的

可能性为 68.3%；或者说，对某一次测量结果，真值在  $\bar{x} - S_x$  到  $\bar{x} + S_x$  区间内的概率为 68.3%。它可以表示这一列测量值的精密度，反映出测量值的离散程度。标准偏差小就表示测量值很密集，即测量的精密度高；标准偏差大就表示测量值很分散，即测量精密度低。现在很多计算器上都有这种统计计算功能，可以直接用计算器求得  $S_x$  和  $\bar{x}$  等数值。

需要指出的是，在多次测量时，正负随机误差常可以大致相消，因而用多次测量的算术平均值表示测量结果可以减小随机误差的影响。但多次重复测量不能消除或减小测量中的系统误差。

需要强调的是，当测量次数很少时，不适用于贝塞尔公式计算。尽管增加测量次数可以提高测量精度，但测量次数越多，越难保证测量条件的恒定，从而带来新的误差，因此一般情况下测量次数在 10 次以内较为适宜；在物理实验课上，由于时间的限制，通常取 5~8 次。

除系统误差和随机误差外，还有粗大误差。粗大误差是因某些突发性的异常因素所造成的。例如读数、记录、计算等明显性过错，以及在测量进行过程中受到较大的突然冲击、振动和干扰的影响等这些异常的误差因素，显著地歪曲了测量结果，应当按一定的准则判定，将含有粗大误差的数据予以剔除。

#### 1.1.4 测量精度

误差反映了测量结果与真值的差异。差异小，俗称精度高；差异大则精度低。按误差的种类，可将精度分为如下几种：

- (1) 正确度：表示测量结果中系统误差大小的程度。
- (2) 精密度：表示测量结果中随机误差大小的程度。
- (3) 精确度：测量结果中系统误差与随机误差的综合，表示测量结果与真值的一致程度。

## 1.2 测量结果表示与不确定度计算

测量的目的是不但通过测量得到待测量的最佳估计值，而且要对最佳估计值的可靠性作出评定。在物理实验中，常用不确定度来对测量结果的可靠程度进行评定。不确定度是指由于测量误差的存在而对测量结果的不能肯定的程度，它是被测量的真值在某个量值范围的一个评定。不确定度的大小，反映了测量结果可信赖程度的高低。不确定度越小，测量结果与真值越靠近，其使用价值越高；反之，不确定度越大，测量结果与真值越远离，其使用价值越低。用不确定度来评定实验结果的误差时，其中包含了随机误差和系统误差，表达了它们对测量结果的综合影响，更准确地表述了测量结果的可靠程度。

### 1.2.1 不确定度的分类

通常以  $\Delta$  表示不确定度。不确定度根据其性质和估算方法不同，可分为 A 类不确定度和 B 类不确定度。A 类不确定度是对测量数据进行统计分析而获得的不确定度分量，B 类不确定度则是非统计方法获得的不确定度分量。

#### 1. A 类不确定度 $\Delta_A$

在物理实验教学中，为简便计，把一测量列的标准偏差作为 A 类不确定度分量，即

$$\Delta_A = S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.2.1)$$

标准偏差  $S_x$  和不确定度中的 A 类分量  $\Delta_A$  是两个不同的概念, 在物理实验中当  $5 < n \leq 10$  时, 取  $S_x$  值当作  $\Delta_A$  是一种最方便的简化处理方法。

标准偏差  $S_x$  可以用科学计算器上的统计功能直接算出。

## 2. B 类不确定度 $\Delta_B$

用其他非统计方法估出的那些分量, 它们只能基于经验或其他信息作出评定。B 类不确定度的来源可能很多而且复杂, 在本课程中只能加以简化处理, 常用的方法是用仪器误差  $\Delta_{\text{仪}}$  进行估计, 按均匀分布模型, 有

$$\Delta_B = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3} \quad (1.2.2)$$

应该指出, 随机误差和系统误差并不简单地对应于 A 类和 B 类不确定度分量。如对于未能进行  $n$  次重复测量的情况, 其随机误差就不能利用统计方法处理, 而要利用被测量可能变化的信息进行判断, 这就属于 B 类不确定度分量。

## 1.2.2 不确定度计算

### 1. 直接测量值不确定度的计算

(1) 多次直接测量。当各量相互独立时, 用平方和根法将上述两类不确定度分量合成即得总不确定度, 简称不确定度:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{S_x^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (1.2.3)$$

评价测量结果时, 有时也写出相对不确定度, 相对不确定度用百分数表示:

$$E = \frac{\Delta}{\bar{x}} \times 100\%$$

(2) 单次直接测量。在实际测量中, 有时测量不能或不需要重复多次, 或者仪器精度不高, 测量条件比较稳定, 多次测量同一物理量结果相近。例如用准确度等级为 2.5 级的万用表去测量某一电流, 经多次重复测量, 几乎都得到相同的结果。这是由于仪器的精度较低, 一些偶然的未控因素引起的误差很小, 仪器不能反映出这种微小的起伏变化。因而, 在这种情况下, 我们只需要进行单次测量。

对于单次测量, 显然不能求出单次测量的 A 类不确定度的分量  $\Delta_A$ 。尽管  $\Delta_A$  依然存在, 但在单次测量的情况下, 往往是  $\Delta_{\text{仪}}$  要比  $\Delta_A$  大得多。按照微小误差原则, 即只要  $\Delta_A < \frac{1}{3}\Delta_B$  (或  $S_x < \frac{1}{3}\Delta_{\text{仪}}$ ), 在计算  $\Delta$  时就可以忽略  $\Delta_A$  对总不确定度的影响。所以, 对单次测量,  $\Delta = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3}$ 。

(3) 测量结果不确定度的表示。用不确定度表示测量结果时, 应写成

$$\left. \begin{aligned} x &= \bar{x} \pm \Delta x \quad (\text{单位}) \\ E &= \frac{\Delta x}{\bar{x}} \times 100\% \end{aligned} \right\}$$

不确定度愈小, 测量质量愈好; 不确定度愈大, 测量质量愈差。



测量结果表示的几项重要原则:

(1) 不确定度  $\Delta$  的取舍法则。

1) 不确定度的位数: 根据有关规范, 在测量结果的最后表述中, 不确定度的有效数字位数允许取 1~2 位。在连续计算过程中, 为了防止取舍太多而对计算结果产生太大影响, 中间运算结果的有效位数可以多保留几位。相对不确定度的有效数字的位数一般保留 2 位。

当不确定度数值较小时, 如果保留 1 位, 有些情况下会产生较大的修约误差。如, 某测量结果的不确定度经计算为 0.145m, 若保留 1 位有效数字, 因修约引起的误差超过 30%, 对评价测量质量影响很大。为便于学习, 本课程约定:

当  $\Delta$  首位数  $\geq 3$  时, 保留 1 位有效数字; 当首位数  $\leq 3$  时, 保留 2 位有效数字。

2) 不确定度的修约: 在保留测量不确定度的有效位数时, 需要对数值进行进位或舍位处理。为避免因舍去的数值而降低测量不确定度的可靠性, 本课程约定:

只进不舍, 即只要欲舍位有非零数字必须进位。如  $\Delta=0.32$ , 进成  $\Delta=0.4$ ;  $\Delta=0.556$ , 进成  $\Delta=0.6$ 。

(2) 测量结果  $\bar{x}$  的取舍法则。

1) 测量结果的位数: 根据确定有效数字估计数字的基本原则, 也为了使测量结果表示规范, 测量结果的末位应与不确定度的末位对齐, 称为末位对齐原则。

例如:  $R=(4.733 \pm 0.018) \times 10^3 \Omega$ 、 $R=(1.204 \pm 0.007) \times 10^3 \Omega$  都是正确的书写方法; 而  $R=(4.73 \pm 0.018) \times 10^3 \Omega$ 、 $R=(1.2042 \pm 0.007) \times 10^3 \Omega$  则是错误的。

2) 测量结果的修约: 在对测量结果尾数进行截断时, 处理办法有两种, 一种方法是常用的“四舍五入”法则, 这种法则比较简单, 但不是很合理, 因为“入”的概率大于“舍”的概率; 另一种方法是遵循《数值修约规则与极限数值的表示和判定》(GB/T 8170-2008), 采用“四舍六入五进偶”法则进舍, 该法则也称偶数规则。

“四舍六入五进偶”法则: 尾数小于 5 则舍去(四舍), 尾数大于 5 则进 1(六入), 尾数等于 5, 则要看需要保留的末位数是偶数还是奇数, 是偶数则舍去尾数, 保留末位上原有的偶数; 是奇数则进 1, 把末位上的奇数增 1 变成偶数(五进偶)。

例如: 欲保留三位有效数字, 则 1.8346 写成 1.83, 1.8366 写成 1.84, 1.8350 写成 1.84, 1.8450 写成 1.84。

例 1.2.1 1 级千分尺的仪器不确定度为  $+0.004\text{mm}$ , 用它测一钢丝直径共 5 次, 得测量列 0.515mm, 0.512 mm, 0.515 mm, 0.510 mm, 0.514mm。测量前检查零点, 发现有  $+0.013\text{mm}$  的零值误差(被测的量为零时, 仪器偏离零的示值)。求测量结果。

解: 先计算直径  $d$  测量列的平均值

$$\bar{d} = 0.5132\text{mm}$$

由于存在零值误差, 需要修正

$$\bar{d}_{\text{修}} = 0.5002\text{mm}$$

下面计算直径的不确定度  $\Delta_d$ :

$$\Delta_A = S_d = 0.00217\text{mm}$$

$$\Delta_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = 0.00231\text{mm}$$