

高等学校教材

# 大学物理实验

University Physics  
Experiments

邵贵江 刘大卫 主编

高等教育出版社

高等学校教材

# 大学物理实验

*Daxue Wuli Shiyan*

主 编        邵贵江 刘大卫

参 编        李晓利 冯发勇 刘小钦  
              刘广群 程莉娜 李淑慧  
              苏 琴 周广东 王 越

高等教育出版社·北京

## 内容提要

本书根据《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)编写而成。全书除绪论外分为5章,共选编了34个实验,在实验选择、教学要求、内容安排上都结合了多年的教学实践和长期积累的教学经验。

本书较系统地阐述了与大学物理实验有关的测量误差与数据处理方面的知识,集中介绍了有关物理实验中的基本测量方法、操作调节技能等方面的知识,并对选编的34个实验按要求和层次进行了分类。各实验相互独立又循序渐进,内容由浅入深,由易到难,由简到繁,以期能够较好地培养学生的创新能力。

本书可作为高等学校理工科大学物理实验课程的教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 郜贵江, 刘大卫主编. -- 北京 : 高等教育出版社, 2015.3  
ISBN 978-7-04-042121-7

I. ①大… II. ①郜… ②刘… 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 028924 号

策划编辑 王 硕  
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 马天魁  
责任校对 张小镬

封面设计 王 琰  
责任印制 田 甜

版式设计 童 丹

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 固安县铭成印刷有限公司  
开 本 787 mm × 960 mm 1/16  
印 张 16.75  
字 数 300 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 3 月第 1 版  
印 次 2015 年 3 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 42121-00

# 前 言

大学物理实验是高等学校理、工、农、林、医等专业学生的重要基础课。它担负着培养学生的实验科学基础理论、实验操作技能、科学素养和动手创新能力、科学探索能力的重要任务。在科学技术迅猛发展, 社会、企业对高校毕业生的科学素质和科技创新能力的要求日益增强的今天, 大学物理实验课程起着重要的不可替代的作用。本书以《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010 年版) 为指导, 结合我校的具体实际, 吸收参考了其他院校物理实验教材之所长编写而成。

本书的绪论部分对物理实验课程作出概要介绍, 指出了课程的具体培养目标和一般学习方法。第一章介绍测量不确定度与数据处理, 阐述了误差、不确定度的基本概念及二者之间的关系, 指出了“不确定度对实验结果进行评估”的普遍性及必要性。在具体操作上, 作了必要的简化处理, 使学生能够逐步掌握和领会不确定度理论的初步运用。最后简要叙述了物理实验中的有效数字和常用数据处理方法。第二章讨论了物理实验中基本的实验测量方法和实验操作技能。第三章至第五章共选编了 34 个实验, 按实验内容、实验仪器和实验要求, 分成基础实验, 基本实验以及综合性、应用性实验与近代物理实验 3 个部分。为使学生在实验知识、实验方法、实验技能和误差与数据处理各方面能够得到由浅入深、由易到难、由简到繁、循序渐进的系统训练, 达到培养学生进行科学实验的能力, 提高科学实验素养的目的, 本书的前期实验写得比较细致、具体, 给出了有关的数据记录表格、数据处理要求以及误差计算和结果表示, 以便于学生参考学习。在后续实验中, 本书的写法逐渐简略, 突出实验原理和思路, 将一些细节问题留给学生去思考和探索, 以利于培养学生的创新意识、创新精神和创新能力。

本书中各实验使用的基本仪器都作了介绍, 以便和实际操作结合起来。每一实验前都有“实验目的”, 实验后一般都有“思考与讨论”, 以便指导学生做好实验前的预习和实验后的进一步分析、讨论和巩固、提高。

参加本书编写工作的有李晓利(绪论、第一章、第二章)、邵贵江(实验 1、实验 6、实验 10、实验 17、实验 18、实验 19、实验 20、实验 21、实验 28、实验 31、实验 32、附录 1、附录 5)、苏琴(实验 2、实验 3、实验 8、附录 3)、周广东(实验 4、实

验 5、实验 14、附录 2、附录 4)、李淑慧(实验 7、实验 22、实验 25)、程莉娜(实验 9、实验 11、实验 12)、冯发勇(实验 13、实验 23、实验 24)、刘广群(实验 15、实验 16)、刘小钦(实验 27、实验 30、实验 33)、王越(实验 29、实验 34)、刘大卫(实验 26、附表)。

本书的出版凝聚了集体的智慧和辛劳,在编写过程中得到劳令耳老师和黄英才老师的大力支持和帮助,编者在此表示衷心感谢。限于编者的经验和水平,加上编写时间仓促,书中难免有欠妥之处,恳请读者不吝指正。

编 者

2014 年 11 月

# 目 录

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 绪论                    | 1   |
| 第一章 测量不确定度与数据处理       | 6   |
| § 1-1 测量与误差           | 6   |
| § 1-2 测量不确定度与测量结果的表示  | 11  |
| § 1-3 有效数字            | 17  |
| § 1-4 实验数据处理          | 19  |
| 练习题                   | 25  |
| 第二章 物理实验的基本方法和技能      | 28  |
| § 2-1 物理实验中的基本实验测量方法  | 28  |
| § 2-2 物理实验中的基本调整与操作技术 | 33  |
| 第三章 基础实验              | 36  |
| 实验 1 长度与物体密度的测量       | 36  |
| 实验 2 气体比热容比的测量        | 45  |
| 实验 3 用单摆测重力加速度        | 48  |
| 实验 4 伏安法测电阻           | 51  |
| 实验 5 万用电表的组装          | 56  |
| 实验 6 薄透镜焦距的测量         | 59  |
| 实验 7 示波器的使用           | 66  |
| 第四章 基本实验              | 75  |
| 实验 8 液体黏度的测量          | 75  |
| 实验 8-1 用毛细管法测定水的黏度    | 75  |
| 实验 8-2 用落球法测定液体的黏度    | 77  |
| 实验 9 液体表面张力系数的测量      | 81  |
| 实验 10 杨氏模量            | 85  |
| 实验 11 用扭摆法测刚体转动惯量     | 91  |
| 实验 12 弦振动的研究          | 97  |
| 实验 13 用电位差计测量电源电动势    | 103 |
| 实验 14 用模拟法研究静电场       | 108 |

|         |                       |     |
|---------|-----------------------|-----|
| 实验 15   | 电桥的使用 .....           | 113 |
| 实验 16   | 灵敏电流计特性的研究 .....      | 121 |
| 实验 17   | 用霍尔效应测磁场 .....        | 127 |
| 实验 18   | 分光计的调整和三棱镜顶角的测定 ..... | 132 |
| 实验 19   | 等厚干涉——牛顿环 .....       | 140 |
| 实验 20   | 利用双棱镜干涉测量光的波长 .....   | 147 |
| 实验 21   | 光栅衍射 .....            | 151 |
| 第五章     | 综合性、应用性与近代物理实验 .....  | 155 |
| 实验 22   | 声速的测定 .....           | 155 |
| 实验 23   | 用电位差计校正电表 .....       | 160 |
| 实验 24   | 热电偶特性研究 .....         | 165 |
| 实验 25   | 用示波器测绘磁滞回线和磁化曲线 ..... | 168 |
| 实验 26   | 电子和场 .....            | 173 |
| 实验 26-1 | 电子射线的电磁聚焦 .....       | 173 |
| 实验 26-2 | 电子射线的电磁偏转 .....       | 179 |
| 实验 27   | 测量单缝衍射的光强分布 .....     | 184 |
| 实验 28   | 迈克耳孙干涉仪 .....         | 188 |
| 实验 29   | 亥姆霍兹线圈磁场的测定 .....     | 194 |
| 实验 30   | 密立根油滴实验 .....         | 200 |
| 实验 31   | 光电效应测普朗克常量 .....      | 205 |
| 实验 32   | 弗兰克-赫兹实验 .....        | 211 |
| 实验 33   | 金属电子逸出功的测定 .....      | 217 |
| 实验 34   | 数字万用表的设计 .....        | 223 |
| 附录      | .....                 | 232 |
| 附录 1    | 实验报告示例(一) .....       | 232 |
| 附录 2    | 实验报告示例(二) .....       | 235 |
| 附录 3    | 热学实验基础知识 .....        | 239 |
| 附录 4    | 电磁学实验常用基本仪器简述 .....   | 241 |
| 附录 5    | 光学仪器的使用和维护规则 .....    | 248 |
| 附表      | .....                 | 250 |

# 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，物理学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的科学发展观和方法论，深刻影响着人类对物质世界的基本认识以及人类的思维方式和社会生活。

## 一、物理实验课的地位和作用

物理学本质上是一门实验科学。无论是物理规律的发现，还是物理理论的建立，都必须以严格的物理实验为基础，并经受物理实验的检验。从杨氏双缝实验对于光的波动理论，到光电效应实验对于光的粒子性，到电子在晶体上的衍射实验对于德布罗意的微观粒子的波粒二象性；从卢瑟福的 $\alpha$ 粒子散射实验对于原子的核式模型，到迈克耳孙-莫雷实验对于爱因斯坦的相对论，都无不生动地说明了这一点。

科学实验是人们按照一定的研究目的，借助特定的仪器设备，人为地、可控制地模拟自然现象，对自然事物和自然现象进行精密、反复地观察和测试，以探索自然事物内部规律性的一种实践活动。这种对自然事物和自然现象的有目的性、有组织性、可控制的探索活动是科学理论的源泉，也是工程技术的基础。

物理实验是科学实验的先驱。在物理学的发展过程中，人类积累了丰富的实验思想、实验方法和实验技能，创造出各种精密巧妙的仪器和设备，这些都是自然科学各学科的科学实验基础，是现代高新技术的源泉。原子能、半导体、激光、超导、空间技术、现代生命科学和技术等最新科技成果，其产生和发展都有赖于物理实验及其相关理论的建立。

大学物理实验是为高等学校理工科各专业学生专门设置的一门基础课程，是学生进入大学后，系统地接受实验方法和实验技能训练的开端。物理实验教学与物理理论教学具有同等重要的地位，二者既有深刻的内在联系和配合，又有各自独立的任务和作用。物理实验课强调实践和动手能力，对于初学者，这是一项非常细致和复杂的工作。同时，物理实验课覆盖面广，具有丰富的实验

思想、实验方法和实验手段，并且能提供综合性很强的基本实验技能训练，因此物理实验课是培养学生科学实验能力、提高科学素质修养的重要基础。总之，物理实验课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。

## 二、物理实验课的任务

物理实验课的任务是：

(1) 培养学生基本的科学实验技能，提高学生的科学实验基本素质，使学生初步掌握实验科学的思想和方法。

(2) 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。

(3) 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、严谨认真的科学态度、积极主动的探索精神以及遵守纪律、团结协作的良好品德。

物理实验课的教学内容包括力学实验、热学实验、电磁学实验、光学实验和近代物理实验，就这些教学内容来说，物理实验课的任务包含了对学生的基本能力的培养和综合能力的培养两方面。

### 1. 基本能力

(1) 掌握测量误差和不确定度的基本知识，能逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估。

(2) 掌握处理实验数据的常用方法，包括列表法、作图法、最小二乘法、逐差法。

(3) 掌握一些基本物理量和常用物理量的测量方法，这些物理量包括长度、质量、时间、热量、温度、电流、电压、电阻、磁感应强度、电子电荷、普朗克常量、里德伯常量等。

(4) 了解常用的物理实验方法并逐步学会使用它们，这些实验方法包括比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、干涉法等。

(5) 掌握实验室常用仪器的性能并能够正确使用它们，这些仪器包括长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、直流电桥和交流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光仪、光谱仪、常用电源和光源等。

(6) 掌握常用的实验操作技术，这些操作技术包括零位调整、水平调整和竖直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查与排除等。

## 2. 综合能力

(1) 独立实验的能力。通过阅读实验教材、查询有关资料和思考问题,掌握实验原理及方法,做好实验前的准备。正确使用仪器及辅助设备、独立完成实验内容、撰写合格的实验报告。

(2) 分析与研究的能力。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分析、判断、归纳与综合,掌握通过实验进行对物理现象和物理规律的分析与研究的基本方法。

(3) 理论联系实际的能力。通过实验发现问题、分析问题,学习解决问题的科学方法,运用所学的知识和技能解决实际问题。

(4) 创新能力。能够完成具有设计性、综合性内容的实验,有条件的还可进行初步的具有研究性或创意性内容的实验。

## 三、物理实验课的学习程序

物理实验课一般分为三个阶段进行。

### 1. 课前预习

物理实验课的教学任务比较繁重,实验课课堂教学的时间又很有限,因此必须做好课前预习。课前预习包括阅读教材的有关内容及参考资料,弄清实验目的、实验原理,了解所用实验仪器的结构、用法,明确测量对象和方法,了解实验的主要步骤及注意事项等。在此基础上写好预习报告,列出必需的数据记录表格,以便对实验要做什么,怎样做有一个总体的认识。这样,在实验时才能有的放矢地听取指导教师讲解,积极主动地进行操作和测量,高质量地完成实验课的学习任务。

在预习报告中事先列出数据表格是很重要的,往往只有真正理解了如何做实验才能画好表格。表格中要留有余地,以便有估计不到的情况发生时能够记录。

此外,还应根据实验内容准备好实验中所需的绘图工具、计算器等。

### 2. 实验操作

动手进行实验操作前,首先要结合仪器实物,对照实验教材或仪器说明书熟悉仪器的结构和用法,还要进行实验装置的安装和调整。实验中应注意观察实验现象,出现问题应及时向指导教师报告。实验测量应遵循“先定性、后定量”的原则,即先定性观测实验全过程,确认整个实验装置工作正常,对所测内容做到心中有数,再定量读记实验数据。

做好实验记录是科学实验的一项基本功。实验时应将所测数据及时记入数据记录表格,同时要注意数据的有效数字是否正确。若发现测量数据有错误,

可用一直线将其划去，在旁边补上正确数据，不得随便涂改，要保留“错误”数据，供必要时分析、讨论。原始数据记录要交由指导教师审阅签字。若有错误或遗漏，应找出原因，及时补测或重做。

实验时要记录所用仪器的名称、规格、型号和主要技术参数，被测样品的编号，有关的室温、大气压等实验环境条件及实验中出现的故障情况和特殊现象等。

应逐步学会根据实验原理和实验数据来分析实验情况是否正常，测量误差是否合理，测量结果是否正确。逐步学会判断和排除实验中出现的简单故障。不能满足于机械地按照教材上的实验步骤进行操作、测取数据，而应随时注意对实验进行分析、思考，真正做到既动手又动脑，不断提高进行科学实验的能力。

大学物理实验是教学实验，与科学实验有所不同。教学实验中的实验结果往往是预知的或有公认值。实验结果与公认值不一致的情况时常会发生，这种不一致的原因，不一定是学生操作的失误、概念理解不当或计算错误，它可能是由于仪器设备不正常，或环境等其他原因造成的。决不可认为实验结果与公认值越接近就表明实验做得越好。从学生学习的角度来说，过程比结果更重要。只有在一个个实验中，通过观察、测量、计算的具体过程，动手动脑，才能真正学到实验知识，理解实验方法和理论，训练实验技能，养成认真严谨的科学态度和实事求是的科学作风，培养出进行科学实验的能力。教师对学生的培养与评价，也应侧重于实验的态度与作风，以及发现、分析、解决问题的能力。

实验时，应严格遵守实验室的有关规章制度，以保护人身安全和仪器设备的安全。实验完成后，应整理好仪器设备，关好水、电等，方可离开实验室。这些都是一个实验工作者的基本素质，要养成良好的习惯。

### 3. 撰写实验报告

实验报告是实验者对实验工作的全面总结。要用简练的文字、必要的数字和适当的图表将实验过程和完整的实验结果真实地反映出来。

实验报告的内容主要包括：为什么和如何做实验、记录实验条件和实验过程中得到的全部信息、分析和解释实验结果、得出实验结论等。实验报告的字迹应端正、数据要齐全、图表要规范。对实验过程和结果的讨论要具体深入，有分析，有见解。对于实验原理、实验步骤等内容，应在理解教材内容的基础上，用自己的语言扼要表述。

## 四、 预习报告和实验报告

本课程将预习报告和实验报告合二为一，仍称为实验报告。实验前在预习

部分中写过的内容，在实验后的实验报告中不必再写，即实验报告的内容分为两部分，一部分在实验前完成，一部分在实验后完成。

### 1. 实验前应完成的内容

(1) 实验名称、实验者姓名和班级、实验日期等。

(2) 实验目的。

(3) 实验仪器。列出所用主要实验仪器及材料的名称、规格和数量。

(4) 实验原理。实验原理包括实验设计的思路、实验原理图(电学实验的电路图、光学实验的光路图等)以及实验所依据的主要公式(包括公式中各量的物理意义及适用条件)。实验原理应写得简明扼要。

(5) 简要的实验步骤。总结重要的或关键的几条，以备实验时按步骤进行。

(6) 实验注意事项。

(7) 数据记录表格。仿照教材中的表格或按要求自行设计，以备实验时记录数据用。

### 2. 实验后应完成的内容

(1) 数据处理及实验结果。包括实验数据的记录、实验结果的计算、所要求的作图、实验误差的分析计算和实验结果的表达。

(2) 思考与讨论。包括对实验结果的说明、对实验中出现的问题的讨论、回答思考题或讨论题以及实验的心得体会等。

实验报告统一用专门的实验报告纸书写。附录1和附录2给出了撰写实验报告的示例。

# 第一章 测量不确定度与数据处理

物理实验的任务，除了要定性地观察实验中所发生的物理现象之外，还要对具体的物理量进行测量。由于测量条件的非理想性，测量总是有误差的，则测量结果便表现出一定范围内的不确定性。因此，一个完整的测量结果不仅应包括被测量的数值和单位，还应包括对测量结果的可信赖程度的评定，这就是测量不确定理论的主要内容。

## §1-1 测量与误差

### 1-1-1 测量

测量就是借助一定的仪器、量具将待测的物理量与选定的标准量进行比较的过程。测量结果包括数值和单位两部分，单位即选定的标准量，数值则是被测量与标准量的比值。

测量分为直接测量与间接测量。

#### 1. 直接测量

直接测量是用仪器或量具直接得到待测量的数值。如用米尺测量长度、用秒表测量时间、用电表测量电流、电压等。直接测量又分单次测量和多次测量。

单次测量是只测量一次的测量，主要用于测量精度要求不高的场合，或测量条件变化迅速、难以进行多次测量的场合，或测量过程带来的误差远大于仪器最大允差的场合。

多次测量是测量次数超过一次的测量，这是物理实验中最常见的情形。按测量条件划分，多次测量又可划分为等精度测量和非等精度测量。等精度测量是在同等条件下重复多次的测量。在等精度测量过程中，测量方法、仪器、环境、操作人员等条件都相同，测量结果的可靠性和精度完全相同。非等精度测量是在不同的测量条件下进行的多次测量，主要用于比较不同的测量条件对测量结果的影响，多见于高精度测量的场合。

## 2. 间接测量

通过一个或几个直接测量的量, 根据已知的函数关系计算出待测物理量的值。如用单摆法测重力加速度、用伏安法测电阻等。

### 1-1-2 测量误差

由于仪器、实验条件、环境等因素的限制, 测量不可能无限精确, 物理量的测量值与其真值(真值表示物理量的客观数值)之间总存在一定的差异, 这种差异就是测量误差。误差与错误不同, 错误是应该而且可以避免的, 而误差是不可能绝对避免的。

测量误差定义为测量值与真值之差, 即

$$\delta = x - a \quad (1-1)$$

其中  $x$  为测量值,  $a$  为物理量的真值。 $\delta$  的量纲与测量值的量纲相同。 $\delta$  表示了测量值偏离真值的绝对数值, 又称绝对误差。有时也用绝对误差与真值的百分比来表示测量误差, 即

$$E_r = \frac{\delta}{a} \times 100\% \quad (1-2)$$

$E_r$  称为相对误差。显然,  $E_r$  是一个量纲为 1 的量。在实际工作中, 常用相对误差表示测量结果的准确度。

由误差的定义可以看出, 由于测量值的真值不可能得到, 误差自然也无从得知。因此, 如何求得待测物理量的最佳测量值(即最佳值), 以及如何估计最佳值的可信程度(即不确定度)就成为测量不确定度理论的首要任务。

测量误差按其产生的条件可分为系统误差、随机误差和过失误差三类。

#### 1. 系统误差

对于同一物理量进行多次等精度测量, 误差的大小、正负都是恒定的, 或按照一定的规律变化, 此类误差称为系统误差。系统误差的重要特征就是具有某种确定性。

系统误差又可分为可定系统误差和未定系统误差。

可定系统误差是指在测量中大小和正负可以确定的误差。例如测量仪器和仪表的零位不准、采用伏安法测电阻时电流表和电压表的内阻因素等, 它们就使得测量结果中引入了可定系统误差。在测量中应消除可定系统误差, 例如实验前应校准仪器仪表的零位, 或记下仪器仪表的初读数, 引入修正值等(称为已定系统误差), 并在测量结果中予以扣除。

未定系统误差是由仪器、仪表的最大允差引起的误差。仪器的最大允差又称为仪器误差限, 用  $\Delta_{\text{仪}}$  表示, 它是指由于仪器的精度或等级的限制, 在正常

使用的情况下仪器有可能产生的最大误差。测量中，我们可以确定此项误差的大小范围，即误差取值于 $[-\Delta_{\text{仪}}, \Delta_{\text{仪}}]$ 这个区间的概率为1，但不能确定误差的大小和正负。未定系统误差给测量结果带来了一个不确定的范围，它们构成了不确定度的一个分量。按照不确定度理论，可将未定系统误差合成到测量结果的不确定度之中。

产生系统误差的原因有如下几个：

测量仪器。由于仪器结构上不够完善或仪器未经很好校准等原因会产生误差。例如，各种刻度尺的热胀冷缩，温度计、表盘的刻度不准确等都会造成误差。

测量原理、测量方法的近似性。由于实验本身所依据的理论、公式的近似性，或者对实验条件、测量方法的考虑不周也会造成误差。例如，热学实验中常常没有考虑散热的影响，用伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响等。

环境因素。由于仪器所处的环境（如温度、湿度、压力等）条件产生了确定的偏离将引起误差，例如规定在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 使用的标准电池在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下使用等。

操作人员因素。由于测量者的生理特点，例如反应速度，分辨能力，甚至固有习惯等也会在测量中造成误差。例如在对准读数标志时总是偏左或偏右，掐表计时时总是超前或滞后等。

系统误差经常是一些实验主要的误差来源，而依靠多次测量一般不能发现或消除系统误差。因此，实验者应不断总结经验，掌握各种因素引起的系统误差的规律，以采取相应的措施降低系统误差的影响，提高实验水平。在实验前进行理论分析，考察测量公式成立的前提是否完备、分析仪器的使用条件是否正常，在可能的情况下尝试不同的实验仪器、不同的实验方法、不同的测量条件和操作人员进行实验，对比实验结果，以发现系统误差。对一些可定系统误差，可以采用特定的测量方法来消除。例如可采用替代法，在相同的测量条件下，用已知量（可变的标准量）替代待测量，调节已知量使替代前后产生的测量状态完全相同，则已知量的大小即为待测量值。显然，这一方法应用了一个非常朴素的思想：如果一个物理量（已知量）与另一个量（待测量）在相同的测量条件下引起的效果完全相同，则二者必相等。还可采用交换法，交换待测物的位置，使仪器可能的系统误差对两次测量结果的影响相互抵消，以消除系统误差。例如在天平上交换待测物与砝码的位置，若两次测量待测物的质量分别为 $m'$ 和 $m''$ ，则待测物的质量为 $m = \sqrt{m'm''}$ ，用此方法可以消除天平的不等臂系统误差。此外还有异号法、零示法、半周期法等，可在以后具体的实验中接触到。

## 2. 随机误差

在对同一物理量的多次测量中, 误差的大小、正负起伏不定, 呈现出随机事件的特征, 此类误差称为随机误差。

在物理实验中, 当测量的次数比较多时, 随机误差大多遵从正态分布。正态分布曲线如图 1-1 所示, 其分布函数(概率密度函数)为

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

(1) 正态分布的特性。式(1-3)中的  $\sigma$  称为标准差, 它是正态分布的特征量。按照概率理论, 误差  $\delta$  出现在区间  $(-\infty, +\infty)$  为必然事件, 因此有  $P = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta) d\delta = 1$ , 即曲线与横轴所围面积恒

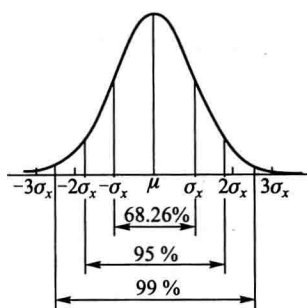


图 1-1 正态分布曲线

为 1。根据式(1-3)可知  $f(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$ , 这表明  $\sigma$  越小,  $f(0)$  就越大, 要保持曲线与横轴的面积不变, 则曲线必越尖锐, 反之越平坦。因此, 标准差  $\sigma$  越小, 说明测量列的离散性小, 重复测量的结果相互接近, 测量的精度高, 随机误差小。反之, 如果标准差  $\sigma$  较大, 则误差分布的范围变宽, 测量列的离散性大, 测量精度低, 随机误差大。标准差  $\sigma$  的大小反映了测量值的集中程度, 也反映了随机误差的大小。

按照概率理论, 误差在区间  $[-\sigma, \sigma]$  出现的概率  $P = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\delta) d\delta = 0.683$ , 区间  $[-\sigma, \sigma]$  称为置信区间,  $P$  称为置信概率。按照同样的方法可算出误差在区间  $[-2\sigma, 2\sigma]$ 、 $[-3\sigma, 3\sigma]$  出现的概率为 0.954 和 0.997, 即置信区间越大, 相应的置信概率越高。

随机误差的正态分布具有四个重要特性: a. 单峰性: 小误差多而集中, 在  $\delta=0$  处形成一个峰值, 这表明物理量的测量值大多出现在其真值附近。b. 对称性: 绝对值相同的误差出现的概率相同。c. 有界性: 绝对值大的误差出现的概率很小,  $\pm 3\sigma$  为误差界限。换言之, 误差值在区间  $[-3\sigma, 3\sigma]$  内的概率差不多达到百分之百。d. 抵偿性: 当测量的次数  $n \rightarrow \infty$  时,  $\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \rightarrow 0$ , 因此通常采用多次测量取平均值的方法, 以减小随机误差的影响。

(2) 最佳测量值、测量列的标准偏差。设对物理量  $x$  进行了多次等精度测量, 得到测量列  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。由于是等精度测量, 因此可以认为这  $n$  个测量值具有相同的标准差  $\sigma$ 。概率理论表明: 当系统误差不存在时, 测量列的算

术平均值  $\bar{x}$  被称为物理量  $x$  的真值的最佳估计, 即  $\bar{x}$  为  $x$  的最佳测量值。 $\bar{x}$  定义为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-4)$$

对于有限次的测量(测量次数为  $n$ , 测量列为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), 定义

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-5)$$

为测量列的贝塞尔标准偏差, 其中  $x_i - \bar{x}$  称为偏差或残差。根据概率理论,  $S_x$  为标准差  $\sigma$  的估计量,  $S_x$  和  $\sigma$  一样, 都反映了测量列的离散程度。

(3) 平均值的标准差。由于我们用测量列的算术平均值  $\bar{x}$  作为物理量  $x$  的真值的最佳估计, 因而人们关心的往往不是测量列的分布特性, 而是测量结果(即算术平均值  $\bar{x}$ )的分布特性。根据概率理论,  $\bar{x}$  亦为统计量, 遵从正态分布, 其标准差为

$$S_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{n}} S_x = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-6)$$

标准差  $S_{\bar{x}}$  的意义是算术平均值  $\bar{x}$  出现在区间  $[\bar{x} - S_{\bar{x}}, \bar{x} + S_{\bar{x}}]$  内的概率为 0.683, 出现在区间  $[\bar{x} - 2S_{\bar{x}}, \bar{x} + 2S_{\bar{x}}]$  内的概率为 0.954, 出现在区间  $[\bar{x} - 3S_{\bar{x}}, \bar{x} + 3S_{\bar{x}}]$  内的概率为 0.997。由此可见, 由于随机误差的存在, 导致了待测物理量  $x$  的测量结果  $\bar{x}$  有一个不确定的范围,  $S_{\bar{x}}$  就反映了这个范围的大小, 从而反映了测量误差的大小。我们把  $S_{\bar{x}}$  称为平均值的一倍标准差, 它构成了测量不确定度的另一重要分量。

(4) 有限次测量的  $t$  因子。严格的正态分布只适用于无限多次测量的情形, 而实际的测量总是有限次的, 对于有限次的测量, 实际随机误差分布为  $t$  分布, 这种分布的分布曲线与正态分布曲线相似, 只是略微平坦(注意: 严格的正态分布只适用于无限多次测量的情形)。对有限次测量的结果, 要保持同样的置信概率, 就要扩大置信区间。扩大置信区间的方法是将式(1-6)中的标准差  $S_{\bar{x}}$  乘上一个大于 1 的因子  $t$ , 即

$$S'_{\bar{x}} = t S_{\bar{x}} = t \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-7)$$

因子  $t$  与测量次数和所选的置信概率有关, 表 1-1 给出了置信概率  $P = 0.683$  时的  $t$  因子。从表 1-1 中我们可以看出, 当测量次数  $n \geq 6$  时,  $t \approx 1$ ,

这时, 可取  $S'_{\bar{x}} \approx S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ 。