



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
全国高等医药院校规划教材

# 医学物理学实验教程

第2版

主编 李宾中



科学出版社



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
全国高等医药院校规划教材

# 医学物理学实验教程

第2版

主 编 李宾中

副 主 编 廖新华 曾林泽 于 毅 王昌军 计晶晶

编 委 (按姓氏笔画排序)

于 毅 (新乡医学院)

陈 虹 (川北医学院)

王亚平 (锦州医科大学)

陈 霞 (包头医学院)

王光昶 (成都医学院)

陈海峰 (川北医学院)

王昌军 (锦州医科大学)

幸浩洋 (四川大学)

计晶晶 (包头医学院)

夏仁江 (遵义医学院)

汤明玥 (川北医学院)

曾林泽 (川北医学院)

李宾中 (川北医学院)

雍 杰 (川北医学院)

何 忠 (川北医学院)

廖新华 (第三军医大学)

张益珍 (四川大学)

薛晋惠 (川北医学院)

陈启平 (遵义医学院)

学术秘书 陈海峰 (川北医学院)

汤明玥 (川北医学院)

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书参考近年来物理学教学内容的新进展,在第1版的基础上充实完善编写而成。全书共分五章,循序渐进地分为基础实验、综合实验和设计性实验、仿真实验等四个部分。第一章讲述了测量误差、不确定度和数据处理的基本知识,这是本课程必须掌握的基础知识。第二章为基础实验,共选入19个实验,系统地介绍了物理实验的基本方法和基本技能的要求,主要对学生进行基本实验方法、技能的训练。第三章为综合性实验,共选入8个实验,实验难度有所增加,适当增加了与医学关系密切的新内容。主要培养学生综合实验能力和应用物理知识的能力。第四章为5个设计性实验,只给出了供选择的研究课题、实验要求和相关的知识材料等,主要培养学生的独立思考能力、分析问题和创新能力。第五章为3个仿真实验。书末附有医学物理学设计性实验的基础知识、学生论文选编以及常用基本物理常量,以供学习参考。

本教材供高等院校医学各专业学生使用,也可供生命科学等相关专业的师生作为参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

医学物理学实验教程 / 李宾中主编, —2 版. —北京: 科学出版社, 2016.8  
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材·全国高等医药院校规划教材  
ISBN 978-7-03-048200-6

I. ①医… II. ①李… III. ①医用物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①R312-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 093742 号

责任编辑: 朱 华 / 责任校对: 赵桂芬

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 陈 敬

版权所有, 违者必究。未经本社许可, 数字图书馆不得使用

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

大厂书文印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010年8月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016年8月第 二 版 印张: 12 1/2

2016年8月第七次印刷 字数: 287 000

定价: 35.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

科学实验是人类创造性的实践活动之一。它的主要任务是：研究人类尚未认识或尚未充分认识的自然过程；发现未知的自然规律；创立新学说、新理论；研制、发明新材料、新方法和新工艺，为生产实践提供科学理论依据，促进生产技术的进步和革命，提高生产力水平。近代自然科学的重大突破，通常不是直接来自生产实践，而是科学实验研究的结果。

物理实验是科学实验的基础和重要组成部分。物理实验的思想、方法、技术和装置常常是自然科学研究和工程技术发展的新起点。而高新技术的发展，又不断推动着实验物理研究的手段、方法和装备的发展，大大改变着人类对物质世界认识的深度和广度。

物理学的大多数定律都建立在严格的实验基础之上。即使在已有物理知识的基础上，通过大胆假设和逻辑推理而建立起来的物理学新理论，也必须通过实验来验证。物理实验课教学还担负着培养学生的基本操作技能，培养学生进行科学实验的能力和良好的工作作风的任务。所以，物理实验课教学是物理学教学中不可缺少的重要组成部分。

本书是在我们以前的实验教材基础之上，参照国内兄弟院校的经验，以及我们多年的实验教学改革，并考虑到近年来物理学教学内容的新进展，充实完善编写而成的。

全书共分五章，根据先易后难和循序渐进的原则，将物理实验分为测量误差与实验数据处理、基础实验、综合性实验、设计性实验和仿真实验等五个部分。第一章讲述了测量误差、不确定度和数据处理的基本知识，这是本课程必须掌握的基础知识。第二章为基础实验，共选入19个实验，系统地介绍了物理实验的基本方法和基本技能的要求，各实验都有明确的目的和要求，有简明扼要的实验原理和操作步骤，对数据的处理和误差的计算都有严格的规范，从而将有利于学生自学。主要对学生进行基本实验方法、技能的训练。第三章为综合性实验，共选入8个实验，实验难度有所增加，适当增加了与医学关系密切的新内容。主要培养学生综合实验能力和应用物理知识的能力。第四章为设计性实验，共选入5个实验，只给出了供选择的研究课题、实验要求和相关的知识材料等，主要培养学生的独立思考能力、分析问题和解决实际问题的能力、应用物理知识的能力和创新能力；激发学生的科学研究激情，发挥学生的聪明才智。第五章为3个仿真实验，利用多媒体教学，实现教学模式的多样化。书末附有医学物理学设计性实验的基础知识、学生论文选编以及常用基本物理常量，以供学生参阅。

本教材主要供高等医学院校的临床医学、预防、基础、护理、影像、检验、麻醉、中医学、中西医结合、口腔、药学、法医等专业用，也可供医学院校其他专业、生命科学有关专业的师生作为参考用书。

本书中的绪论和第一章由李宾中编写，第二章由李宾中、曾林泽、陈启平、薛晋惠、雍杰、陈海峰、何忠、汤明玥、陈虹、王昌军、王亚平、于毅等编写，第三章由李宾中、王光昶、幸浩洋、张益珍等编写，第四章由廖新华、李宾中编写，第五章由陈霞、计晶晶、幸浩洋编写。虽然，编写者在编写过程中非常认真并多次修改，但受限于编者的学识水平，加之脱稿仓促，书中谬误和不妥之处难免，恳切希望读者批评指正，不胜感激！

编 者

2010年5月

# 目 录

|                           |    |           |                      |     |
|---------------------------|----|-----------|----------------------|-----|
| 绪论                        | 1  | 实验 2.13   | 交流电路的研究              | 83  |
| 第一章 测量误差与实验数据处理           | 5  | 实验 2.14   | 用双棱镜测光波波长            | 87  |
| 第一节 测量与误差                 | 5  | 实验 2.15   | 用光栅测波长               | 91  |
| 第二节 误差的分类及其特点             | 6  | 实验 2.16   | 旋光仪的使用               | 94  |
| 第三节 随机误差的估算               | 8  | 实验 2.17   | 分光计的调节和使用            | 98  |
| 第四节 测量结果的不确定度评定           | 12 | 2.17.1    | 反射法测三棱镜顶角 $\alpha$   | 98  |
| 第五节 有效数字                  | 16 | 2.17.2    | 自准法测三棱镜顶角 $\alpha$   | 103 |
| 第六节 实验数据处理的基本方法           | 18 | 2.17.3    | 最小偏向角法测三棱镜<br>玻璃的折射率 | 104 |
| 习题                        | 23 | 2.17.4    | 测量光栅常数和光波波长          | 105 |
| 第二章 基础实验                  | 25 | 2.17.5    | 用分光计观察明线光谱           | 108 |
| 实验 2.1 长度测量与圆柱体密度的<br>测定  | 25 | 实验 2.18   | 偏振光的研究               | 110 |
| 2.1.1 长度测量                | 25 | 实验 2.19   | 用光电比色计测定溶液<br>的浓度    | 113 |
| 2.1.2 圆柱密度的测定             | 31 | 第三章 综合性实验 |                      | 117 |
| 实验 2.2 杨氏模量的测定            | 33 | 实验 3.1    | 人耳听觉听阈曲线的<br>测定      | 117 |
| 实验 2.3 用驻波法测振动频率          | 37 | 实验 3.2    | 人体阻抗及阻抗频率特性<br>的测量   | 121 |
| 实验 2.4 超声仪的使用             | 39 | 实验 3.3    | 多普勒效应综合实验            | 125 |
| 实验 2.5 液体黏滞系数的测定          | 44 | 实验 3.4    | 人眼的屈光不正及其<br>光学矫正    | 130 |
| 实验 2.6 液体表面张力系数的<br>测定    | 47 | 实验 3.5    | 显微照相术                | 137 |
| 2.6.1 用拉脱法测量液体表面张<br>力系数  | 47 | 实验 3.6    | 全息摄影                 | 144 |
| 2.6.2 用毛细管法测量液体表面<br>张力系数 | 49 | 实验 3.7    | 放射性活度的测量             | 148 |
| 实验 2.7 万用电表的使用            | 52 | 实验 3.8    | 光电效应和普朗克常数的<br>测定    | 153 |
| 实验 2.8 用模拟法研究静电场          | 58 | 第四章 设计性实验 |                      | 159 |
| 实验 2.9 惠斯通电桥              | 61 | 实验 4.1    | 生物膜电位测量的设计           | 160 |
| 2.9.1 用惠斯通电桥测电阻           | 61 | 实验 4.2    | 光学仪器的组装与参数<br>测量的设计  | 162 |
| 2.9.2 用热敏电阻测量温度           | 64 | 实验 4.3    | 物理因子对液体力学性质<br>的调控研究 | 164 |
| 实验 2.10 用补偿法测电动势          | 67 |           |                      |     |
| 实验 2.11 电子示波器的使用          | 71 |           |                      |     |
| 实验 2.12 心电图机的使用           | 79 |           |                      |     |

|                                    |     |                                |     |
|------------------------------------|-----|--------------------------------|-----|
| 实验 4.4 物理因子对血液流变学特<br>性的调控研究 ..... | 165 | 附录 .....                       | 181 |
| 实验 4.5 生物组织光学特性研究 .....            | 165 | 附录 1 医学物理设计性实验的<br>基础知识 .....  | 181 |
| 第五章 仿真实验 .....                     | 168 | 附录 2 学生论文选编 (学生实验<br>实例) ..... | 183 |
| 实验 5.1 超声波测声速 .....                | 168 | 附录 3 一些基本物理常量 .....            | 190 |
| 实验 5.2 霍尔效应 .....                  | 173 | 参考文献 .....                     | 194 |
| 实验 5.3 光的偏振 .....                  | 177 |                                |     |

# 绪 论

科学实验是科学理论的源泉，是工程技术和应用的基础，作为未来的高级人才不仅应具备深广的理论知识，而且还应具有从事科学实验的能力，以适应科学技术飞速发展、社会不断进步的需要。

## 一、物理实验的重要性

物理学所研究的规律在自然界中具有最基本、最普遍的意义，从而决定了物理学是各门科学技术的基础。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，实验是决定性的因素；离开了实验，物理理论就会苍白无力，就会成为“无源之水，无本之木”，不可能得到发展。今后在探索和开拓新的科技领域中，实验仍然是十分重要的。

16 世纪伟大的实验物理学家伽利略，用他出色的实验工作把古代对物理现象的一些观察和研究引上了当代物理学的科学道路，使物理学发生了革命性的变化。1672 年，牛顿对理论和实验的关系阐述得很明白：“探求事物属性的准确方法是从实验中把它们推导出来。……考察我的理论的方法就在于考虑我所提出的实验是否确实证明了这个理论；或者提出新的实验去验证这个理论。”事实上，牛顿提出过许多理论，其中，万有引力定律被海王星的发现和哈雷彗星的准确观测等实践所证明；而他关于光的本性的学说却被杨氏干涉实验和许多衍射实验所推翻。经典物理学的基本定律几乎全部是实验结果的总结与推广。

现代医学广泛运用了物理学原理、方法和技术，物理学已是现代医学不可缺少的基础。在生命科学的发展史中，离不开各类显微镜的贡献。DNA 的双螺旋结构就是英国物理学家和美国遗传学家共同建立并为 X 光衍射实验所证实的，而对 DNA 的操纵、切割、重组也都需要实验物理学家的帮助；在医学中，从 X 光透视、超声诊断、CT 诊断、MRI 诊断，到各种理疗手段，包括放射性治疗、激光治疗、 $\gamma$  刀等等都是物理学的应用。而这些应用无不与实验密切相关。

大学生不仅要掌握已知，更要培养探索未知的能力。而探索未知，只靠读书是不够的，更要靠实践。物理实验课就是对学生进行科学实验能力基础训练的一门无法取代的实践性课程。通过物理实验主要学习各种基本实验方法、熟悉基本实验仪器，熟悉数据采集、处理、分析和表达的方法，同时培养观察能力、思维能力、分析能力和综合判断能力。

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，物理实验对于各专业的大学生都是十分重要的。

然而，物理实验的重要性却往往被忽视。中国社会长期以来重理论轻实践的错误观念

至今仍有影响。著名华裔实验物理学家丁肇中(诺贝尔物理学奖得主)说:“我是一个做实验的工程师。希望通过我的得奖,能提高中国人对实验的认识。没有实验就没有现代科学技术。”因此,必须摒弃旧观念,重视物理实验,学好物理实验,为将来的学习和工作打下坚实的基础。

## 二、医学物理实验的目的和任务

实验教学与理论教学具有同等重要的地位,它们既有深刻的内在联系,又有各自的任务和作用。当代大学生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。物理实验是对学生系统地进行科学实验能力训练的开端和基础,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、拓展知识,培养理论联系实际,加强操作动手能力,提高科学素质。

医学物理实验既是医学物理学的重要组成部分,也由于它本身特有的目的和任务而具有相对独立性。本课程具体的教学目的和任务是:

**1. 学习和掌握物理实验的基本知识** 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理知识,加深对物理学原理的认识和理解。使学生掌握基本的实验方法、实验技能、基本物理量的测量原理和方法,熟悉常用仪器的基本原理、结构、性能及使用方法,正确合理地使用仪器。

**2. 培养与提高学生的科学实验能力** 注重培养并逐步提高学生对实验现象的观察和分析能力,以及理论联系实际的综合分析能力。这其中包括:

- (1) 能够通过阅读实验教材或资料,作好实验前准备;
- (2) 能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器;
- (3) 能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断;
- (4) 能够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。

**3. 培养与提高学生的科学素养** 养成实事求是的科学态度、理论联系实际的科学作风、积极创新的科学精神、严肃认真的工作态度,主动研究的探索精神,遵守纪律、团结协作和爱护公共财物的优良品德。这是在整个教学过程中都要贯彻的要求,而在物理实验教学中是特别重要的。

“实践是检验真理的唯一标准”。在物理实验课中最能培养实事求是、严谨踏实的科学态度。任何弄虚作假,篡改甚至伪造数据的行为都是绝对不能允许的,也是比较容易发现的。实事求是的严谨态度与积极创新的科学作风是相联系的。在严谨的实验中才能发现真正的问题,而解决这些问题往往就需要坚韧不拔的毅力和积极创新的思维。实际上,只要认真去做实验,一定会发现许多问题,其中有些问题是教师也未必能解决的。所以,实验室应当而且可以成为培养学生求实态度和创新精神的最好场所。

物理实验课是一门实践性课程。学生在教师指导下通过自己主动、独立地完成实验课题的过程中,增长知识,提高能力,养成科学素养。要实现上述教学目的,在很大程度上取决于学生自己的主动精神和努力程度。

## 三、医学物理实验的教学要求

为达到上述教学目的,作好物理实验,应该达到以下三个基本要求:

**1. 预习** 预习是上好实验课的基础和前提。没有预习,或许可以听好一堂理论课,但决不可能完成好一堂实验课。

实验前必须预习实验内容、做好实验准备工作。通过预习实验教材、参考资料,弄清实验目的、原理、仪器,了解实验要求及实验中应特别注意的问题等。在此基础上,写出简要的预习报告,内容包括:实验名称、目的、仪器、简要的原理及计算公式、记录测试数据的表格,以及简单的电路图、光路图等。

**2. 实验操作与记录** 进入实验室,首先必须详细了解并严格遵守实验室的各项规章制度。这些规章制度是为保护人身安全和仪器设备安全而规定的,违反了就可能酿成事故,这是必须牢记的。

实验是整个教学中最重要的一环。动手能力、观察能力、分析问题和解决问题等能力的培养,主要在具体实验时完成。必须充分利用有限的课堂时间,提高学习效果。为此,必须注意:

(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、重点及提示等做简要讲解,学生应认真听讲并做好记录。

(2) 进行实验: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,合理布局仪器,安全操作,按步骤进行。在正式获取实验数据之前,要把仪器设备调试到最佳工作状态。要明确每一步操作的意义,切忌盲目操作。注意细心观察实验现象,认真钻研和探索实验中的问题。不要急躁,不要期望实验工作会一帆风顺,在遇到问题时,应看作是学习的良机,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) 实验记录:认真观察,正确记录原始数据与实验现象。

在科学研究中,从准备课题、考察分析、实验实施、测试数据、计算推导等过程中会积累大量的原始笔记,这些第一手材料通常称之为实验记录。实验记录是科学工作者提出成果、检验成果的重要依据,又是日后进一步研究的基础资料。因而,严谨的科学工作者对实验记录都十分重视和珍惜。实验记录看来很平凡,但要做好却并不简单。

“千里之行,始于足下”。同学们一开始就应养成严格、严密、严肃的科学作风,做好实验记录。一个好的实验记录应做到“四懂”,即:自己看得懂,别人看得懂,现在看得懂,将来也看得懂。那么具体如何记呢?一般说来,一个实验记录应包括:①写明实验名称,实验日期,同组人,实验的条件,如温度、湿度等。②仪器的规格、型号、参数等。③按照有效数字正确地记录实验数据,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。

实验记录应用钢笔或圆珠笔记录,文字、符号、数码要写清楚,不要让别人或自己以后辨认时引起疑惑或误解。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,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。最忌讳在原数据上涂改。在实验过程中观察到的现象、出现的故障及排除的情况都要及时记录下来。实验记录是从准备实验直到完成实验的全过程的工作记录,应该包括所有检验实验结果时所必须的记载,是整理实验报告的依据。要求同学们向老师交实验报告时附上实验记录,以供老师批阅评审。不要使用铅笔及涂改液,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。

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重新连接仪器。整理还原仪器,经教师验收后,方可离开实验室。

**3. 撰写实验报告** 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。写实验报告是培养实验研究人才的重要一环。实验结束后,应及时写出实验报告。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实验仪器设备。④实验原理。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,切忌照抄书本。⑤实验步骤和内容。简明写出实验过程的关键步骤,观察了哪些物理现象,测量了哪些物理量。⑥数据记录与处理。设计表格记录实验数据,以完整的实验数据计算、作图等表示测量结果。⑦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,以改进实验。⑧小结或讨论:简明写出对实验现象的分析,对实验关键问题的研究体会,实验的收获和建议,解答思考题。

注意:撰写实验报告时,决不可任意伪造或篡改实验数据,这是基本的科学道德。教学实验与科学实验不同,教学实验结果往往是预知的,或有公认值的。实验结果与公认值不一致的情况是经常会发生的。这种不一致的原因,不一定是因为学生操作的失误、概念理解不当或计算错误,它也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,得分也会越高;更不可为追求实验结果与公认值的一致而伪造或篡改实验记录。从学生学习的角度讲,过程比结果更重要。教师对学生的培养与评价,侧重于实验的态度与作风,以及发现、分析、解决问题的能力。

实验报告应在实验后一周内交实验老师。

(李宾中)

# 第一章 测量误差与实验数据处理

物理实验的目的是探寻和验证物理规律。定性观察和定量测定是物理实验不可分割的两个方面。但更重要的是要揭示物理量间的内在数量关系,为此就需要对物理量进行测量。测量获得的大量数据,必须经过正确有效的处理,才能得出合理的结论,从而把感性认识上升到理性认识,形成或验证物理规律。因此,实验误差分析和实验数据处理是实验工作者必备的知识 and 能力。本章对这方面的知识做一入门介绍。

## 第一节 测量与误差

在实际测量中,总会有误差。随着科学技术的发展,可以将误差控制得愈来愈小,但仍然还会有误差。误差贯穿于整个实验过程,因此,在整个实验过程中都必须考虑误差的影响,并控制好各个环节的误差,以得到最佳的实验结果。

### 一、测 量

**1. 单位和标准** 物理量的大小是由数值和单位结合在一起表示的,因而每一个物理量都必须规定出它的单位。由于各个物理量之间并不是互相独立的,而是由许多物理定义和物理规律联系起来的,所以,只要规定了少数几个物理量的单位,其他物理量的单位就可以根据定义或物理规律推导出来。

独立定义的单位叫做基本单位,所对应的物理量叫基本量。由基本单位导出的单位叫做导出单位,对应的物理量叫导出量。例如,长度的单位为米(m),质量的单位为千克(kg),物质密度  $\rho$  的单位就可根据定义  $\rho=m/V$  导出为千克 / 立方米( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )。

在物理学发展过程中,曾建立过各种不同的单位制,这些单位制选取的基本量各不相同,常造成混乱,带来许多不便。1960 年国际计量大会正式通过了一种通用的适合一切计量领域的单位制,叫做国际单位制(SI)。SI 的 7 个基本单位定义如下:

- (1) 长度单位: 米(m)。米等于光在真空中  $1/299\,792\,458\text{s}$  时间间隔内所经路径的长度。
- (2) 质量单位: 千克(kg)。千克等于国际千克原器的质量。
- (3) 时间单位: 秒(s)。秒是  $^{133}\text{Cs}$  原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的  $9\,192\,631\,770$  个周期的持续时间。
- (4) 电流单位: 安培(A)。在真空中,截面积可忽略的两根相距  $1\text{m}$  的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时,若导线间相互作用力在每米长度上为  $2 \times 10^{-7}\text{N}$ ,则每根导线中的电流为  $1\text{A}$ 。
- (5) 热力学温度单位: 开尔文(K)。开尔文是水三相点热力学温度的  $1/273.160$
- (6) 发光强度单位: 坎德拉(cd)。坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度,该光源发出频率为  $540 \times 10^{12}\text{Hz}$  的单色辐射,且在此方向上的辐射强度为  $(1/683)\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。
- (7) 物质的量单位: 摩尔(mol)。①摩尔是一系统的物质的量,该系统中所包含的基本

单元数与  $0.012 \text{ kg}$  碳-12 的原子数目相等；②在使用摩尔时，基本单元应予指明，可以是原子、分子、离子、电子以及其他粒子，或是这些粒子的特定组合。

除以上 7 个基本单位外，SI 还有两个辅助单位，即平面角以弧度为单位(rad)和立体角以球面度为单位(sr)。有了这几个基本单位，其他物理量的单位就全部可以导出。

我国的法定计量单位，就是以国际单位制为基础制定的。

**2. 测量** 测量是一种比较过程，就是把被测量和体现计量单位的标准量作比较。确定出被测量是计量单位的若干倍，这个倍数值和单位一起表示被测量的测量值。

测量可分为两类：直接测量和间接测量。用仪器或仪表直接读出测量值的，称为直接测量。例如，用米尺测量长度、用天平称质量、用温度计测量温度、用万用电表测量电流或电压、用钟表计时等。直接测量是最基本的测量。然而，大多数的物理量不能直接测出，而要由直接测量值，再经过物理公式计算得出被测量值，这称为间接测量。例如，测量铜柱密度时，可以直接用尺子量出它的直径  $d$  和高度  $h$ ，用天平称出它的质量  $m$ ，再由公式  $\rho = 4m/\pi d^2 h$  来计算其密度。显然，间接测量是以直接测量为基础的。

无论直接测量还是间接测量都可分为单次测量和多次测量。多次测量又分为等精度测量和不等精度测量。实验中对同一待测量，用同一仪器(或精度相同的仪器)，在同一实验条件下进行的多次测量称为等精度测量，否则，称为不等精度测量。等精度测量得到的各个测量值的可靠性是相同的。

在实际工作中，并不是任何测量都要求愈准愈好，而是根据工作的实际需要而定。有人统计过，当把测量准确度提高一个数量级时，测量成本大致上也将提高一个数量级。

## 二、误 差

每一个物理量都是客观存在的，具有不以人的意志为转移的确定的数值，称为该物理量的真值。任何测量，不管仪器多么精密、测量方法多么完善、测量进行得多么仔细，测量结果与被测物理量的真值之间总会有一定的差异。这种测量结果与待测量的真值之间的差值称为**测量误差**，简称**误差**。

设待测量的真值为  $A$ ，测量值为  $x$ ，则其误差  $\Delta x$  为

$$\Delta x = x - A \quad (1-1)$$

式(1-1)中  $\Delta x$  反映了测量值偏离真值的大小和方向，因此也称之为绝对误差。

与绝对误差相对应，还可引入一个相对误差的定义，即相对误差

$$E = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-2)$$

真值是一个理想概念，一般说来真值是实验者不知道的。实际中，常用被测量的理论值、公认值、计量学约定真值和标准器相对真值、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

任何测量所得到的数据都包含一定的误差，没有误差的测量是不存在的。因此，有必要进一步研究误差产生的原因、性质、特点，以便采取措施来减小误差、达到最佳的实验结果。

## 一、误差的分类

根据误差产生的原因与性质,可将误差分为:系统误差、随机误差、粗大误差等。

**1. 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。

系统误差的特征是:在同一条件下,多次测量同一量时,误差的大小和方向保持恒定;或在条件改变时,误差的大小和方向按一定规律变化。例如,计时的秒表走快或走慢;游标尺存在零位误差时,其读数也会总是偏大或偏小;万用电表没有校准时,其读数也会总是偏大或偏小;等等。

系统误差来源于以下几个方面:

(1) 器具误差与调整误差。由于测量器具本身的缺陷所引起的误差,以及由于测量前未能将测量器具或被测对象调整到正确位置或状态所引起的误差。如砝码的质量不准、仪表的零点不准或零点漂移。

(2) 理论误差与方法误差。由于测量理论的近似或测量方法的不完善所引起的误差。如公式的近似性较差,达不到理论要求的条件。

(3) 环境误差。由于实际环境条件与所要求的环境条件不一致所引起的误差。如环境温度、接触电阻、空气浮力等的影响。

(4) 人员误差。由于测量人员主观因素和操作技术所引起的误差。如测量人员个人的生理和心理特点及操作特点造成的读数总是偏大或偏小。

系统误差应设法减小或消除。为此,应选用精度较高的仪器,改进实验的设计并改良测量者读数的习惯,校准仪器等。

**2. 随机误差(又称偶然误差)** 随机误差是指对同一量的测量过程中,以不可预知方式变化的测量误差。

随机误差的特征是其随机性,测量值比真值时而偏大时而偏小,时正时负,其变化不可预知;单次测量的数据所包含的随机误差是不可预知的,但多次测量所得的大量数据中所含的随机误差是服从一定的统计规律的。常见的情况是测量值比真值偏大或偏小的几率相等;小误差比大误差出现的几率大;绝对值很大的误差出现的几率小。

产生随机误差的原因主要是人们感观(如听觉、视觉、触觉等)的分辨力不尽相同,表现为每个人的估读能力不一致;周围环境因素的偶然变化(如环境温度、气流、气压等的波动,杂散电磁场的干扰);以及其他不可预测的次要因素的影响。

随机误差是不可避免的,也是无法控制的,但因为随机误差的出现服从一定的统计规律,所以可以通过增加测量次数,取算术平均值的办法来减小随机误差。

**3. 粗大误差** 粗大误差是指由于粗心大意或发生实验条件突变或实验方法错误而引起的误差,也叫过失误差或粗差。这种错误应当而且能够通过采取严肃认真的态度、纠正实验方法、认真仔细地测量而加以克服,尤其是在科学实验中,应将粗差剔除以提高测量的可靠性。刚进入实验阶段的学生,由于缺乏实验经验,容易出现粗差。因而,学生应在教师指导下,不断总结经验教训,提高实验素养,努力防止粗差的出现。

## 二、描述测量结果的几个术语

对测量结果作总体评定时, 应把系统误差和随机误差联系在一起。精密度、准确度和精确度就是用来评价测量结果好坏的 3 个术语。

(1) 精密度: 指重复测量所得结果之间相互接近的程度, 反映随机误差对测量结果的影响。精密度高, 说明重复性好, 误差分布密集, 即随机误差小。

(2) 准确度: 表示测量值接近真值的程度, 反映系统误差对测量结果的影响。准确度高, 系统误差小。

(3) 精确度: 表示测量值的重复性及接近真值的程度, 是对测量结果中系统误差和随机误差的综合描述。精确度高, 说明精密度和准确度都高, 反映了随机误差和系统误差的综合效果。

三者之间的关系可以通过打靶形象地表示出来, 如图 1-1。

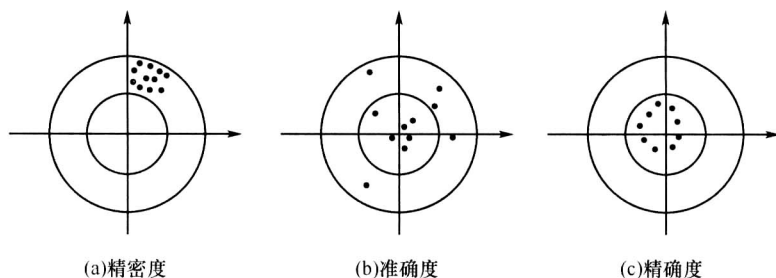


图 1-1 精密度、准确度、精确度等概念示意图

## 第三节 随机误差的估算

系统误差和粗大误差可以通过适当措施来减小或消除, 但测量值中包含的随机误差是不可避免的。

### 一、随机误差的正态分布规律

对大量随机误差的分析, 发现它有以下统计规律: 单峰性、有界性、对称性和抵偿性等。1795 年, 德国物理学家高斯(Gauss)从数学上推导出了随机误差出现的概率密度函数, 称为高斯分布函数, 也叫正态分布函数, 即随机误差符合正态分布规律。正态分布函数为

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

式(1-3)中  $f(\Delta x)$  是误差  $\Delta x$  出现的概率密度;  $\Delta x = x - A$ , 表示每次测量的随机误差;  $A$  为真值, 理论上, 在消除系统误差后, 通过对被测量无穷多次的等精度测量的测量列求算术平均值, 即可得到其真值

$$A = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-4)$$

$\sigma$  称为正态分布因子, 其值是曲线拐点的横坐标值, 如图 1-2(a)所示。 $\sigma$  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。 $\sigma$  越大, 则反之, 如图 1-2(b)所示。显然,  $\sigma$  可以表示随机误差散布情况。 $\sigma$  的数学表达式为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - A)^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2} \quad (1-5)$$

式(1-5)表明,  $\sigma$  是无穷多次测量所产生的随机误差的方均根值, 称为标准误差。

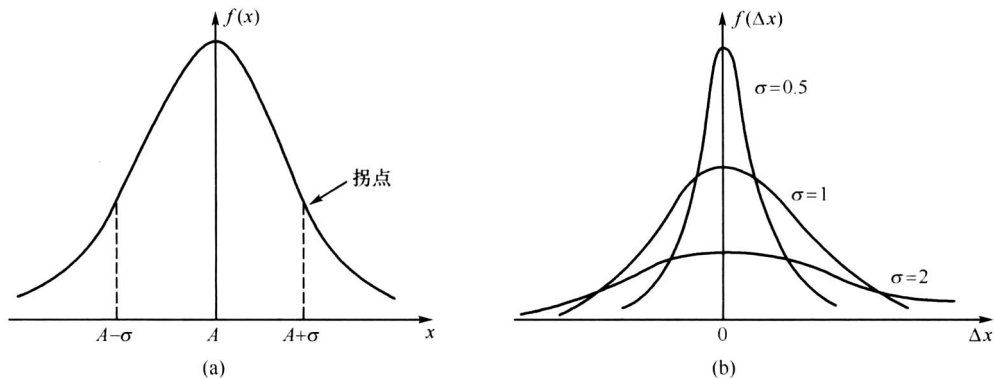


图 1-2 正态分布

由图 1-2(a)可看出, 以测量值  $x$  为横坐标, 则坐标原点处相当于真值  $A$  的位置, 对应  $\Delta x=0$ 。

为了分析随机误差的概率分布, 将概率密度函数在不同区间积分, 可得到随机误差在相应区间的概率值。下面取 4 个典型的区间, 求其对应的概率值:

$$P_1(-\sigma, +\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\Delta x) d\Delta x = 0.683 \quad (1-6a)$$

$$P_2(-2\sigma, +2\sigma) = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(\Delta x) d\Delta x = 0.954 \quad (1-6b)$$

$$P_3(-3\sigma, +3\sigma) = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(\Delta x) d\Delta x = 0.997 \quad (1-6c)$$

$$P(-\infty, +\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta x) d\Delta x = 1 \quad (1-6d)$$

式(1-6a)表示: 随机误差值落在区间  $[-\sigma, +\sigma]$  内的概率为 0.683; 也即, 在区间  $[x_i - \sigma, x_i + \sigma]$  内包含真值  $A$  的概率是 68.3%, 它表明对于只存在随机误差的测量值, 在测量次数无限多时, 如果以任意一次测量值表示测量结果, 当然不知道它的真误差究竟是多少, 但在  $[x_i - \sigma, x_i + \sigma]$  范围内, 包含被测量真值的概率为 68.3%。这就提供了一个以一定概率包含被测量真值的量值范围来表达测量结果精密度的方法。区间  $[-\sigma, +\sigma]$  称为置信区间, 在给定置信区间内包含真值的概率( $P_1=68.3\%$ )称为置信概率。

式(1-6b)~(1-6d)表明: 扩大置信区间, 置信概率就会提高。即, 在区间  $[-2\sigma, +2\sigma]$  内, 置信概率为 95.4%; 在区间  $[-3\sigma, +3\sigma]$  内, 置信概率为 99.7%; 在区间  $[-\infty, +\infty]$  内, 置信概率为 100%。因而只要对测量结果给出置信区间和置信概率, 就表达了测量结

果的精密程度。 $[-3\sigma, +3\sigma]$  这个置信区间表明随机误差超过这个范围的测量值大约在 1000 次测量中只出现 3 次左右, 在一般几十次测量中, 几乎不可能出现, 所以将  $3\sigma$  称为极限误差。

## 二、有限次测量的情况

实际上, 测量不可能进行无限多次, 只能是有限次, 因此要确定真值和标准误差是不可能的。然而, 根据统计学知识可知, 有限次测量的测量值是从无限次测量结果(总体)中抽出的一个样本, 样本在一定程度上必然带有总体的信息, 因此, 可以利用样本来估计总体分布的两个特征值: 真值和标准误差。

**1. 真值的最佳估计值——算术平均值** 即使在实验中将系统误差消减到可以忽略的程度, 通过等精度测量得到一系列的测量值, 依然会含有随机误差。那么, 取怎样的值才是真值  $A$  的最佳估计值呢? 1806 年和 1809 年, 勒让德(Legendre)和高斯(Gauss)为我们开启了解决这个问题的方法。

在测量条件不变时, 对待测量进行  $n$  次等精度测量, 获得  $n$  个测量值

$$x_1, x_2, \dots, x_n$$

则该列测量值的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1-7)$$

而各次测量值的(绝对)误差为

$$\Delta x_i = x_i - A \quad (1-8)$$

式中  $A$  为被测量的真值,  $x_i$  为第  $i$  次测量值。由式(1-7)知, 对  $n$  次测量的(绝对)误差求和得

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = \sum_{i=1}^n x_i - nA$$

上式两边各除以  $n$ , 可得  $n$  次测量的(绝对)误差的算术平均值

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - A = \bar{x} - A \quad (1-9)$$

由于随机误差有一个重要特性: 抵偿性, 即在一列等精度测量中, 由于每次测量值的误差时大时小, 时正时负, 所以误差的算术平均值随着测量次数  $n$  的无限增加而趋于 0, 即

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

于是式(1-9)变为

$$\bar{x} \rightarrow A \quad (1-10)$$

由式(1-10)可知, 在系统误差消减到可以忽略的情况下, 多次测量的算术平均值  $\bar{x}$  是真值  $A$  的最佳估计值, 最佳估计值也叫近真值, 它是最可能接近被测量真值的值。若测量次数无限次增加, 算术平均值就将无限接近真值。

**2. 标准误差  $\sigma$  的最佳估计值——标准偏差** 当测量次数  $n \rightarrow \infty$  时, 随机误差趋于正态分布, 可算出正态分布中的标准差  $\sigma$ 。但实际中只能进行有限次测量, 此时随机误差遵从  $t$  分布(1908 年由戈塞特提出), 由于发表时使用了笔名 “Student”, 故也称为 “学生分布”。

$t$  分布的函数式比较复杂, 可不去管它。 $t$  分布曲线与正态分布曲线的比较如图 1-3 所示。显然, 在有限次测量的情况下( $t$  分布), 要保持同样的置信概率, 显然要扩大置信区间。

设: 实验得到的一个测量列:  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。其中的某一个测量值  $x_i$  和该测量列的算术平均值  $\bar{x}$  之差

$$\Delta v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-11)$$

叫偏差, 也称残差, 它与误差概念式(1-7)是有区别的。显然, 这些残差有正有负, 有大有小。常用“方均根”法对它们进行统计处理, 得到的结果就是测量列的**标准偏差**

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta v_i^2} \quad (1-12)$$

式(1-12)称为贝塞尔(Bessel)公式, 是计算测量结果不确定度时很有用的公式, 其统计学意义是指当测量次数足够多时, 测量列中任一测量值与平均值的偏离落在 $[-S, S]$ 区间的概率为 0.683。

由式(1-5)、式(1-8)、式(1-11)和式(1-12)经必要的数理推导, 可得

$$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta v_i^2} \approx \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}$$

显然, 当  $n \rightarrow \infty$  时, 由上式可得

$$S \rightarrow \sigma \quad (1-13)$$

所以  $S$  是从有限次测量中计算出来的对总体标准误差  $\sigma$  的最佳估计值。不难理解, 由于  $S$  仅是  $\sigma$  的近似值, 当把测量结果表示成  $x_i \pm S$  时(在仅有随机误差, 且随机误差按正态分布的情况下), 包含真值的概率近似为 68%。

$S$  也称为实验标准偏差或样本标准偏差, 它表征对同一被测量作  $n$  次有限测量时, 其结果的分散程度。若  $S$  较大, 就表示测量值很分散, 即测量的精密度低, 随机误差较大。

利用计算器的统计运算模式, 把各次测量值输入计算器, 直接就可得出  $S$  和  $\bar{x}$  等值。

**3.  $t$  因子** 上面已经讲到, 当测量次数  $n \rightarrow \infty$  时, 随机误差符合正态分布, 正态分布有因子  $\sigma$ 。而有限次测量时, 随机误差遵从  $t$  分布。 $t$  分布的因子简称  $t$  因子。在置信概率  $P$  及测量次数  $n$  确定后,  $t$  因子的值可以从专门的数学表中查到。这里只列出  $P = 0.683$ , 测量次数为  $n$  时, 对应的  $t$  因子的值

表 1-1  $P=0.683$  时, 不同测量次数下  $t$  因子的值

| $n$ | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 20   | 30   | 40   | $\infty$ |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $T$ | 1.84 | 1.32 | 1.20 | 1.14 | 1.11 | 1.09 | 1.08 | 1.07 | 1.06 | 1.03 | 1.02 | 1.01 | 1.00     |

从表 1-1 中可见,  $t$  因子随测量次数的增加而趋向于 1, 即  $t$  分布在  $n \rightarrow \infty$  时趋向正态分布。因此, 在测量次数很少时, 要用  $t$  因子修正, 才能更准确地表示测量结果。

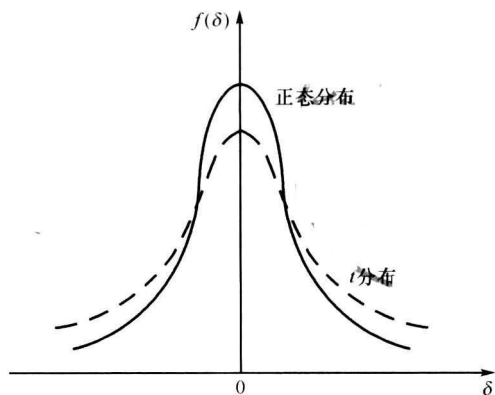


图 1-3  $t$  分布与正态分布的比较示意图