

高等学校物理实验教学示范中心系列精品教材

# 大学物理实验

◎主 编 王 旗



University

Physics Experiments

高等教育出版社

高等学校物理实验教学示范中心系列精品教材

# 大学物理实验

◎主 编 王 旗

◎副主编 刘 静 刘国良 程显中 高 茜

编委

娄晓燕 胡广兴 王 静 朱盼盼 朱雨莲

张德安 柳 艳 赵国俭 宋根宗 张 多

University

Physics Experiments

高等教育出版社·北京

## 内容简介

本书是依据《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),结合东北大学物理实验课教学改革的经验编写而成的。全书共五章:绪论介绍了大学物理实验课程的作用、教学目的、基本程序和要求等;第1章介绍了物理量的测量、误差和不确定度以及常用的数据处理方法;第2章、第3章和第4章按照基础性实验、综合性实验和设计性实验分类,编入了力、热、电、光、近代物理等51个实验项目。本书重点阐述了物理实验的思想与方法,侧重于对学生实验能力的培养。

本书可作为普通高等学校理工科各专业大学物理实验课程的教材,也可作为从事物理实验教学的教师和工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 王旗主编. --北京: 高等教育出版社, 2017.7

ISBN 978-7-04-047778-8

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(2017)第 121412 号

Daxue Wuli Shiyan

|      |     |      |     |      |    |      |    |
|------|-----|------|-----|------|----|------|----|
| 策划编辑 | 顾炳富 | 责任编辑 | 程福平 | 封面设计 | 王洋 | 版式设计 | 童丹 |
| 插图绘制 | 杜晓丹 | 责任校对 | 胡美萍 | 责任印制 | 耿轩 |      |    |

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 北京市密东印刷有限公司  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 17.75  
字 数 330千字  
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.hepmall.com.cn>  
<http://www.hepmall.com>  
<http://www.hepmall.cn>

版 次 2017年7月第1版  
印 次 2017年7月第1次印刷  
定 价 32.50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 47778-00

## 前 言

为了适应国家中长期教育改革和发展规划纲要对新时期人才培养的需求,根据《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),结合东北大学物理实验课的教学改革成果和多年积累的教学经验,我们根据多年来讲义的使用情况,对实验内容进行了修改和补充,组织编写了这本适合于理工科各专业教学使用的大学物理实验教材。

本书提高了教学起点,适当加深了难度,例如增加了实验基础理论的内容;尽量与现代科学技术接轨,将数字仪表、智能仪表、激光技术、传感技术、光纤技术和计算机技术等引入物理实验中;增加了综合性、设计性实验的比例,以加强学生综合能力的培养。在内容安排上,打破了按照力、热、电、光、近代物理的层次教学的模式,建立了将教学内容分为基础性实验、综合性实验和设计性实验三个层次的新体系。

本书包括16个基础性实验、22个综合性实验和13个设计性实验。基础性实验内容涵盖力、热、电、光等方面,目的在于对学生进行基本原理、基本实验技能和数据处理方法的训练。综合性实验和设计性实验引进了先进的实验仪器和近代物理实验项目,目的在于对学生进行综合性物理实验和近代物理实验训练,提高学生综合应用知识的能力和创新能力,增加近代物理实验知识。

实验教学是一项集体事业。本书是集体劳动的结晶,是多年从事物理实验教学的实验教师和技术人员的经验总结,体现出大家的智慧和多年积累的教学成果。

本书在编写过程中,吸收了兄弟院校的宝贵经验,得到了多方面的关怀和支持,在此,我们对本书作出贡献的所有同志表示真挚的谢意。编写一本适用的实验教材,是一项艰巨而复杂的工作,由于我们的水平有限,加之时间仓促,书中难免存在不妥和漏误之处,恳请读者批评与指正。

编者

2017年3月

# 目 录

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 绪论 .....                    | 1   |
| 大学物理实验的地位与作用 .....          | 1   |
| 大学物理实验的教学目的 .....           | 1   |
| 大学物理实验的基本程序 .....           | 2   |
| 大学物理实验的基本要求 .....           | 4   |
| 大学物理实验的安全要求 .....           | 5   |
| 第 1 章 测量、误差及数据处理基本理论 .....  | 6   |
| 1.1 测量、误差、不确定度及有效数字 .....   | 6   |
| 1.2 实验数据处理方法 .....          | 23  |
| 第 2 章 基础性实验 .....           | 34  |
| 实验 2.1 拉伸法杨氏模量的测量 .....     | 34  |
| 实验 2.2 刚体转动惯量的测量 .....      | 38  |
| 实验 2.3 弦线上的驻波实验 .....       | 43  |
| 实验 2.4 稳态法测固体的导热系数 .....    | 46  |
| 实验 2.5 金属线胀系数的测量 .....      | 49  |
| 实验 2.6 示波器的使用 .....         | 51  |
| 实验 2.7 电桥的使用 .....          | 59  |
| 实验 2.8 用电位差计测量电池的电动势 .....  | 67  |
| 实验 2.9 灵敏电流计的研究 .....       | 73  |
| 实验 2.10 电表改装 .....          | 81  |
| 实验 2.11 静电场的模拟与描绘 .....     | 89  |
| 实验 2.12 几何光学 .....          | 94  |
| 实验 2.13 分光计的调节和使用 .....     | 101 |
| 实验 2.14 用牛顿环测量透镜的曲率半径 ..... | 108 |
| 实验 2.15 单色仪定标 .....         | 113 |
| 实验 2.16 液晶电光效应实验 .....      | 117 |
| 第 3 章 综合性实验 .....           | 123 |
| 实验 3.1 动力学法测金属材料的杨氏模量 ..... | 123 |
| 实验 3.2 声速测量 .....           | 130 |
| 实验 3.3 PN 结温度特性的研究 .....    | 136 |
| 实验 3.4 半导体制冷实验 .....        | 140 |

|              |                                    |            |
|--------------|------------------------------------|------------|
| 实验 3.5       | 用冲击电流计测量磁场的分布 .....                | 144        |
| 实验 3.6       | 霍尔效应 .....                         | 150        |
| 实验 3.7       | $RLC$ 电路暂态特性研究 .....               | 155        |
| 实验 3.8       | 铁磁物质动态磁滞回线的测量 .....                | 160        |
| 实验 3.9       | 用光栅测量光波的波长 .....                   | 164        |
| 实验 3.10      | 单缝衍射的实验研究 .....                    | 168        |
| 实验 3.11      | 迈克耳孙干涉仪 .....                      | 172        |
| 实验 3.12      | 偏振光实验 .....                        | 177        |
| 实验 3.13      | 干涉法测量固体的线胀系数 .....                 | 185        |
| 实验 3.14      | 电阻应变式传感器的应用 .....                  | 187        |
| 实验 3.15      | 电涡流位移传感器位移特性的研究 .....              | 190        |
| 实验 3.16      | 差动变压器位移传感器特性的研究 .....              | 194        |
| 实验 3.17      | 晶体电光调制及其应用 .....                   | 198        |
| 实验 3.18      | 全息照相 .....                         | 211        |
| 实验 3.19      | 光纤传感 .....                         | 217        |
| 实验 3.20      | 光纤通信 .....                         | 225        |
| 实验 3.21      | CCD 综合实验 .....                     | 232        |
| 实验 3.22      | 核磁共振 .....                         | 238        |
| <b>第 4 章</b> | <b>设计性实验 .....</b>                 | <b>247</b> |
| 实验 4.1       | 单摆的设计与研究 .....                     | 247        |
| 实验 4.2       | 液体黏度的测量 .....                      | 248        |
| 实验 4.3       | 热敏电阻温度计的设计安装和使用 .....              | 249        |
| 实验 4.4       | 热电偶的定标 .....                       | 250        |
| 实验 4.5       | 非线性电阻测量 .....                      | 251        |
| 实验 4.6       | 电学黑盒子 .....                        | 252        |
| 实验 4.7       | 交流电桥 .....                         | 253        |
| 实验 4.8       | 用读数显微镜测量玻璃的折射率 .....               | 254        |
| 实验 4.9       | 用掠入射法测量固体的折射率 .....                | 255        |
| 实验 4.10      | 用迈克耳孙干涉仪测量物质的折射率 .....             | 256        |
| 实验 4.11      | 用偏振法测量玻璃的折射率 .....                 | 257        |
| 实验 4.12      | 发光二极管的光电特性 .....                   | 258        |
| 实验 4.13      | 光电器件物理特性的研究 .....                  | 259        |
| <b>附录 1</b>  | <b>中华人民共和国法定计量单位 .....</b>         | <b>260</b> |
| 附表 1         | SI 基本单位 .....                      | 260        |
| 附表 2         | 包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位 ..... | 260        |

|             |                                 |            |
|-------------|---------------------------------|------------|
| 附表 3        | 国际单位制以外的我国法定计量单位 .....          | 261        |
| 附表 4        | SI 词头 .....                     | 262        |
| <b>附录 2</b> | <b>大学物理实验常用数据 .....</b>         | <b>263</b> |
| 附表 5        | 常用物理常量表 .....                   | 263        |
| 附表 6        | 在 20 ℃ 时某些物质的密度 .....           | 264        |
| 附表 7        | 在标准大气压下不同温度时水的密度 .....          | 264        |
| 附表 8        | 在海平面上不同纬度处的重力加速度 .....          | 265        |
| 附表 9        | 某些固体的线胀系数 .....                 | 265        |
| 附表 10       | 在 20 ℃ 时某些金属的杨氏模量 .....         | 266        |
| 附表 11       | 在 20 ℃ 时与空气接触的某些液体的表面张力系数 ..... | 266        |
| 附表 12       | 在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数 .....      | 266        |
| 附表 13       | 不同温度时水的黏度 .....                 | 267        |
| 附表 14       | 某些液体的黏度 .....                   | 267        |
| 附表 15       | 某些固体中的声速 .....                  | 267        |
| 附表 16       | 在 20 ℃ 时某些液体中的声速 .....          | 268        |
| 附表 17       | 某些气体中的声速(标准状态下) .....           | 268        |
| 附表 18       | 某些固体的导热系数 $\lambda$ .....       | 268        |
| 附表 19       | 某些固体的比热容 .....                  | 268        |
| 附表 20       | 某些液体的比热容 .....                  | 269        |
| 附表 21       | 不同温度时水的比热容 .....                | 269        |
| 附表 22       | 某些物质的熔点 .....                   | 269        |
| 附表 23       | 某些物质在标准大气压下的沸点 .....            | 269        |
| 附表 24       | 某些金属或合金的电阻率及其温度系数 .....         | 269        |
| 附表 25       | 不同金属或合金与铂(化学纯)构成热电偶的热电势 .....   | 270        |
| 附表 26       | 几种标准温差电偶 .....                  | 270        |
| 附表 27       | 铜-康铜热电偶分度表 .....                | 270        |
| 附表 28       | 在常温下某些物质相对于空气的光的折射率 .....       | 271        |
| 附表 29       | 可见光波长与颜色的关系 .....               | 271        |
| 附表 30       | 常见光源的谱线波长 .....                 | 272        |
| 附表 31       | 汞(Hg)的发射光谱 .....                | 272        |
| <b>参考文献</b> | .....                           | <b>273</b> |

## 绪论

### 大学物理实验的地位与作用

理工科高等教育将使同学们获取和掌握必要的自然科学知识,并为培养在攀登科学技术高峰时所需的各种能力打下必要的基础,以便今后更有效地参加改造自然的实践活动。

人类改造自然的实践活动不外乎生产实践和科学实验两种。所谓科学实验,是人们按照一定的研究目的,借助一定的仪器设备,人为地控制或模拟自然现象,突出主要因素,对自然事物和现象进行精密而反复的观察与测试,探索其内部规律性的实践过程。这种对自然的有目的、有控制、有组织的探索活动是现代科学技术发展的源泉。例如,原子能、半导体和激光等科技成果仅靠总结生产实践经验是不能取得的,只有在科学家的实验室里才能得到。由此可见,科学实验在改造自然的实践中起着举足轻重的作用,因此,在大学教育中必须对学生进行充分的科学实验能力的训练。

物理学是一门实验科学。无论是物理规律的发现,还是物理理论的验证,都离不开物理实验。例如,赫兹的电磁波实验使麦克斯韦电磁场理论获得普遍承认,杨氏干涉实验使光的波动说得以确立,卢瑟福的粒子散射实验揭开了原子的秘密,近代高能粒子对撞实验使人们深入到物质的最深层——原子核和基本粒子的内部——来探索其规律,等等。可以说,没有物理实验,就没有物理学本身。

大学物理实验课是理工科本科生入学后进行系统实验训练的开端,是理工科一门独立的、必修的基础课程。物理实验的知识、方法、习惯和技能既是学生进行后续实践训练的基础,也是毕业后从事各项科学实验的基础。我们要重视实验,细心地做实验,只有具备较为深广的理论知识和较强的科学实验能力的大学生,才能在当代社会成为受欢迎的科技人才。

### 大学物理实验的教学目的

大学物理实验的教学目的是使学生掌握研究各种不同自然现象的基本实验方法、各种基本测量仪器的使用方法、实验结果的科学处理方法和归纳总结实验结果以及撰写报告的基本要领,培养学生的自学能力、思维判断能力、综合运用教材和资料的能力、理论联系实际的能力、科学实验能力、书写表达能力、创新和实验设计能力,并提高学生的科学素质。具体来讲:

(1) 在教学中,通过适当地介绍一些物理实验发展史料和物理实验在工程技术中的应用知识,使学生了解科学实验的重要性;同时,对学生进行辩证唯物主义

NOTE

世界观和方法论的教育,使学生逐步养成运用唯物辩证法指导自己的科学实验活动的习惯.

(2) 培养学生掌握物理实验基本知识和基本实验技术,其中包括:

- ① 独立完成预习、实验操作和撰写实验报告等基本实验程序;
- ② 基本的操作技术;
- ③ 基本的实验方法;
- ④ 基本仪器的结构原理、性能和使用方法;
- ⑤ 常用物理量的基本测试手段,这些物理量有长度(及其微小变化)、角度、质量、时间、力、压强、温度、热量、电流、电压、电动势、电阻、磁感应强度、频率或周期、波长、折射率等;
- ⑥ 数据处理基本知识,包括测量的种类,误差的概念及误差种类,有效数字的读取和运算,不确定度的概念和种类,不确定度估算方法,结果表示,精密度(或精度)、正确度和准确度,处理实验数据的列表法、作图法、逐差法和最小二乘法.

(3) 培养与提高学生的科学实验能力,其中包括:

- ① 自行阅读实验教材或实验资料,正确理解其原理,培养阅读能力;
- ② 逐步实现独立进行测试,独立排除一般故障,培养实际动手能力;
- ③ 注意对实验现象的观察和分析,加深对物理学基本概念和规律的理解,培养运用物理理论对实验现象进行分析判断、理论联系实际的分析问题与解决问题的能力;
- ④ 不断提高实验报告的撰写质量,培养归纳能力和写作能力;
- ⑤ 注意实验方案的确定、实验仪器和方法的选配,直至能够完成较为简单的设计实验,提高设计能力和独立创新能力以及初步的科学研究能力.

(4) 培养与提高科学实验素养,其中包括:

- ① 理论联系实际和实事求是的科学作风;
- ② 严肃认真、一丝不苟的工作态度;
- ③ 积极思维、主动研究问题的探索精神;
- ④ 遵守纪律、爱护公共财物的优良品质.

## 大学物理实验的基本程序

### 1. 实验前的预习

实验预习的目的是全面认识和了解所要做的实验项目.通过阅读实验讲义和有关参考资料,认真领会实验目的,掌握实验原理,熟悉所要使用的仪器,明确测量方法,了解实验的主要步骤及注意事项等.在此基础上,写出预习报告,制作好记录表格.

预习报告是正式报告的一部分,必须在专用的实验报告纸或报告册上认真撰写(不许用红笔或铅笔),要求字迹工整、文字简练、内容全面。内容包括实验名称、目的、仪器和原理,这部分只要求写清主要概念、建立测量公式的依据、原理图、测量公式以及公式或图中没有标注的字母的意义,不要求写出测量公式的推导过程及步骤,还要写出实验中关键性的调整方法和测量技巧。

## 2. 实验操作

在实验课上,同学们必须知道自己要做什么,为什么要这样做。只有这样,在实验课上能力才能得到提高和锻炼。实验课重在实验的过程,这个过程可以培养主动思考、提高分析和解决实际问题的能力。

实验课最忌讳的是盲目伸手,因为这样会产生两类问题:①容易损坏仪器设备,②容易危及自身安全。因此,上实验课一定要有目的、有计划地进行实验操作。

实验过程中,要按照实验步骤进行,认真观察现象,注意进行分析判断,正确地、实事求是地读取和记录测量数据;实验中,若发现问题,应及时向教师请教,不得随意处理;实验完毕,数据应交教师审查通过,再将仪器、桌椅整理好,数据经教师签字后,方可离开实验室。

## 3. 完成实验报告

科学地总结自己的实验工作,通过对实验课题、内容、方法的科学表述,阐明实验的结论,是撰写科技文章的基本训练。一份完整的实验报告可以扩展成一篇科技论文,因此,认真总结实验报告是将来撰写科技文章的基础。报告中应有清晰的思路、齐全的数据图表以及科学的结论。如果预习报告的书写合乎要求,可在此基础上,继续完成下述内容。

### (1) 数据处理

这是实验报告的必备环节,首先要列出实验室所给的数据或查到的数据,再将记录在纸上的原始数据以表格的形式正式列在“数据处理”栏目下;然后写出数据处理的主要过程(例如结果计算时要有数学表达式)、图线、结果、不确定度估算以及结果表达式。

### (2) 分析讨论

要养成对实验结果进行分析的习惯,特别是当结果不确定度较大或测量值偏离标准值较远时,应分析其原因,找出实验中存在的不足。此环节还包括分析讨论实验中存在的异常现象、影响测量结果的主要因素、对实验方案的评述及改进意见等。讨论内容不受限制,但一定要中肯、具体、实在,不要硬凑。

实验报告中的思考题是必答内容,解答写在实验报告的末尾。

## 大学物理实验的基本要求

1. 在整个实验过程中要树立“安全第一”的观念.
  2. 每学期开学第一周,同学们要及时登录大学物理实验选课网站,按网上要求进行选课,记下所选课的课表,必须按自己的课表来实验室上课.
  3. 要按时上课,迟到超过5分钟者,视情况,在实验总成绩中扣分;迟到超过10分钟者,不能上课.
  4. 学生进入实验室须携带本人学生证、事先写好的预习报告和记录实验数据的表格,经教师检查同意,方可进行实验.
  5. 学生进入实验室后,要遵守以下规定:
    - (1) 入室前,要将鞋底擦净;入室后,书包要放在指定地点,不许放在实验台上.
    - (2) 禁止喧哗,保持安静;保持实验室卫生.
    - (3) 要集中精力听讲,不许在下面摆弄仪器或做其他动作.
    - (4) 操作前,应先检查器材是否齐全,如有短缺损坏,应立即提出,不许私自申换使用其他组的器材.
    - (5) 使用电源时,如无特殊声明,必须经过教师检查线路并同意后,方可接通电源.
    - (6) 要爱护实验器具,细心使用,严格遵守操作规程;对于不了解性能或使用方法的器具,切勿乱碰乱拧;转动旋钮时,动作要轻,切忌猛力旋动;光学实验中,不许触摸光学仪器表面.实验器具如有损坏,应立即报告实验室工作人员.
    - (7) 实验中,要保持实验台稳定,勿使其受到震动或严重变形.
    - (8) 仪器设备出现故障时,应立即停止实验,并报告指导教师,在教师指导下,设法排除故障,同时注意培养分析能力和独立工作能力.
    - (9) 做实验时,要一丝不苟,精心操作,仔细观察,积极分析思考,如实记录实验数据.做完实验,应先将测量数据交给教师审查并签字,然后将仪器整理还原,将实验台面和凳子收拾整齐.经教师审查仪器还原情况后,方能离开实验室.未经教师签字的测量数据不生效.
    - (10) 实验失败或误差超限时,应重做实验.
- 学生必须严格遵守上述规定,服从指导,态度要端正;否则,指导教师和实验室工作人员有权停止该生做实验.
6. 要忠实于测量数据,实事求是,不许伪造数据或抄袭他人的数据,一经发现,严肃处理.
  7. 实验报告在实验后1周内交到指导教师专用实验报告箱中.

## 大学物理实验的安全要求

1. 对于每次实验课需要注意的安全问题,实验课指导教师要进行安全提示,并对学生提出相应要求.
2. 学生进入实验室必须穿戴长袖式实验服和包覆式鞋子,严禁穿短裤、拖鞋或凉鞋进入实验室.对不符合着装要求的学生,不允许进行实验.
3. 进行危险性(如高温、高压、高速运转等)实验时,必须有两名指导教师同时在场.
4. 根据实验内容,实验室提供相应的防护装备.
5. 实验室不得乱接乱拉电线,不得超负荷用电,实验室内不得有裸露的电线头,严禁用金属丝代替保险丝,电源开关箱内不得堆放物品.
6. 实验室用电设备和线路、插头插座应经常检查,保持完好状态,所有用电设备做到人走电断.
7. 使用电烙铁,要放在非燃隔热的支架上,周围不应堆放可燃物,用后立即拔下电源插头.
8. 实验室内未经批准、备案,不得使用大功率用电设备,以免超出用电负荷.
9. 凡使用电源的实验,如无特殊声明,必须经过教师检查线路并同意后,方可接通电源.

# 第1章 测量、误差及数据处理基本理论

## 1.1 测量、误差、不确定度及有效数字

### 1.1.1 测量、误差的基本知识

在人类生产、生活和科学研究的过程中,经常需要对各种物理量进行测量,更需要找出各种物理量之间的定量关系.人们要获取量值大小的相关信息,就需要借助某些工具或仪器,于是就存在所获得测量值的可信度问题,因此便引入了测量和误差的概念.

#### 1. 测量及其分类

测量是物理实验的基本操作,其实质是将待测物理量与某种作为标准的同类量作比较,得出他们之间的倍数关系.测量的结果应包括数值(即度量的倍数)和单位(即选定作为标准的同类物理量).

按照获得测量值的方法不同,测量可分为以下两种.

#### (1) 直接测量

用测量器具直接测出物理量值的测量称为直接测量,相应的物理量称为直接测量量.

#### (2) 间接测量

先直接测出与某物理量有关的直接测量量,再根据该物理量与该直接测量量之间的数学关系,算出该物理量量值,该物理量的测量过程称为间接测量,该物理量称为间接测量量.

有时由于受条件限制,对某物理量不可能进行多次重复测量,有时也没有必要多次重复测量,这种情况下便可采取单次测量,除此之外,一般应采取多次测量.

在相同条件下,对某物理量所进行的多次重复测量称为等精度测量;若测量条件在测量过程中有变化,则称为非等精度测量.等精度测量的数据处理比较简单,作为基本训练,本书所涉及的测量如无特殊说明都是等精度测量.

#### 2. 误差及其分类

任何测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察力等都不可能确保测量绝对精确,这就使得测量不可避免地会有误差伴随着产生.分析测量可能产生的各种误差,尽可能地消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出估计,这是物理实验和许多其他科学实验中都必然会涉及的问题,于是就有了误差理论.



测量电子教案



视频:测量

NOTE



误差电子教案



视频:误差

## (1) 真值与误差

### ① 真值

在一定条件下,任何一个物理量所存在的不以人的意志为转移的客观量值,称为真值.真值一般是不可确知的,通常它只有理论上的意义.而用实验手段测量所得的物理量,称为测量值.在一定测量条件下,最接近真值的测量值称为最佳值.

需要特别注意,任何量值必须标有单位,单纯的数值一般不具有任何物理意义.

### ② 误差

测量值  $x$  与其真值  $x_0$  之差即为测量的绝对误差,用符号  $\Delta x$  表示,有

$$\Delta x = x - x_0$$

由于理论或方法、测量器具、环境影响以及人的分辨能力的限制,误差不会绝对降为零,也就是说,真值一般是不可确知的,所以,绝对误差的概念只有理论上的意义.实验结果都存在误差,误差自始至终地存在于一切科学实验的整个过程中,这一结论称为误差公理.

## (2) 误差的分类

设对物理量  $x$  等精度地测量了  $n$  次,得到的测量列为

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

对应的测量误差分别为

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

按照上述误差列所具有的性质和特点,把测量误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三类.

### ① 系统误差

定义:如果各  $\Delta x_i$  大小和符号不变,或者按照某种确定的规律变化,那么称测量列存在着系统误差.系统误差具有确定的性质.

产生原因:仪器或设备不完善(仪器误差或设备误差)、所依据的理论公式具有近似性或实验方法不完善(理论方法误差)、测量环境的影响(环境误差)、观测者的生理和心理特点(个人误差).

### ② 随机误差

定义:如果各  $\Delta x_i$  的符号和大小以不可预知的方式变化,那么称测量列存在着随机误差.随机误差具有随机变化的性质.

产生原因:某些偶然的、不确定因素的影响.例如,环境的温度、气压、电场、磁场的微小扰动,由于操作者视觉和仪器灵敏阈的限制,使指零仪器平衡点确定不准,被测对象本身的微小起伏变化,读数时估读数的一致,等等.

因随机误差是不可预知的,故不能予以排除或修正其影响.但由于随机误差时

正时负、时大时小,所以通过采取多次测量取平均值的方法,可以抵消部分影响.有时,通过改进测量方式,也可以减少随机误差的影响.

随机误差虽然在符号和大小上不确定,但当测量次数较多时,会发现其总体分布服从某种统计规律,本章 1.1.2 节中将简要介绍随机误差.

一个具体测量中所出现的误差往往既含有系统误差,又含有随机误差.实验中,当实验条件稳定且可以掌握系统误差时,应尽量保持在相同条件下做实验,以便修正系统误差;当不能掌握系统误差时,常想出一些办法,使系统误差随机化,以便在多次测量时,取平均值中的一小部分影响.例如,一把直的米尺刻度不均匀,本来属于系统误差,如利用米尺的不同刻度部位对某物体长度进行多次测量,系统误差便随机化了,所求的平均值将更加准确.

应该指出,系统误差与随机误差具有一定的相对意义.例如,已作过温度修正的标准电池的电动势,如果短时间使用,那么环境温度测得不准对电动势的影响属于系统误差因素;如果使用时间较长,由于环境温度在其均值附近作不规则变化,那么环境温度的影响便属于随机误差.另外,随着人们对误差来源及其变化规律认识的加深,有可能把过去认识不到而归于随机误差的某些误差确定为系统误差.因此,将某种误差因素严格地归类为系统误差或者随机误差,有时是难以办到的,现实意义也不大.

### ③ 粗大误差

定义:如果各  $\Delta x_i$  中,有个别的误差明显超出规定条件下的预期值,这样的误差称为粗大误差或过失误差.过失误差具有反常的性质.

产生原因:常由于各种过失造成,比如读错、记错、测量条件或操作不合乎要求、仪器有问题等.

粗大误差对应的测量值为坏值,一旦发现,应从测量列中剔除.

对于某个数值较大的误差是否属于粗大误差,应根据统计学的要求,按照一定的原则进行评判,不能将所对应的测量值随意地从测量列中剔除.

## (3) 测量的精密度、正确度和准确度

### ① 测量的精密度(简称精度)

测量的精密度是指在规定条件下,对被测量进行多次测量时,所得结果之间符合的程度.它表示结果中随机误差大小的程度,随机误差越小,测量精密度越高.

### ② 测量的正确度

测量的正确度表示在规定条件下,测量结果中所有系统误差综合大小的程度.系统误差越小,测量正确度越高.

### ③ 测量的准确度(又称精确度)

测量的准确度表示测量结果与被测量真值之间的一致程度,它反映了测量结

果中系统误差与随机误差的综合大小程度.综合误差越小,测量准确度越高.

由定义可知,精密度高,正确度不一定高;反之,正确度高,精密度不一定高.但准确度高意味着精密度与正确度都高.

现以打靶为例,说明上述概念.在图 1.1.1(a)中,弹着点较集中,彼此间符合得很好,但都偏离靶心较远,类比于精密度高而正确度低的情形;在图 1.1.1(b)中,弹着点很分散,但没有固定的偏向,其平均位置在靶心附近,类比于正确度高而精密度低的情形;在图 1.1.1(c)中,弹着点在靶心附近且很集中,类比于准确度高的情形;在图 1.1.1(d)中,弹着点既分散,又有较大的固定偏向,类比于精密度与正确度都不高的情形.

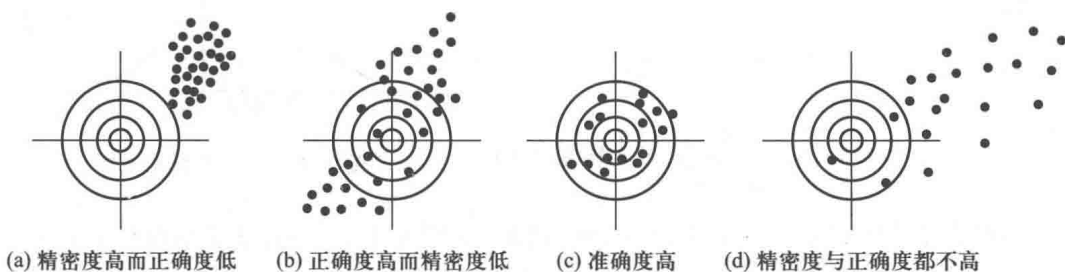


图 1.1.1 测量的精密度、正确度、精确度与射击打靶的类比

### 1.1.2 随机误差简介

首先将无限次测量列所对应的误差列作为研究对象,称为总体或母体,并且假设测量列中只存在随机性误差.

#### 1. 概率密度函数

关于总体误差列的分布情况,可用概率密度函数描写,它定义为

$$f(\Delta x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta p}{\Delta(\Delta x)} = \frac{dp}{d(\Delta x)} \quad (1.1.1)$$

式中  $d(\Delta x)$  表示在误差  $\Delta x$  附近的一个微小误差间隔,  $dp$  表示误差落在  $d(\Delta x)$  内的概率,所以,  $f(\Delta x)$  表示在  $d(\Delta x)$  附近单位误差间隔内出现误差的概率大小.

所谓随机误差的分布情形,是指  $f(\Delta x)$  随  $\Delta x$  的变化情形.按照  $f(\Delta x)$  随  $\Delta x$  变化的不同,随机误差对于个体来说,是重复测量中的任何一次测量所产生的误差,是没有规律、不能控制的,用实验的方法也是无法消除的.但对于总体,即经过多次测量得到的测量值而言,随机误差服从一定的统计规律(正态分布或高斯分布).

#### 2. 正态分布

正态分布的概率密度函数可写成

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1.2)$$

式中  $\sigma$  称为任一次测量值的标准误差,其值为

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

图 1.1.2 即为正态分布曲线.标准误差  $\sigma$  是曲线的拐点. $\sigma$  是评定随机误差的基本指标,它的数值取决于测量工具、仪器仪表、测量环境、测量人员和被测对象等因素.

按照概率统计理论,对式(1.1.2)进行积分,可得

$$\begin{aligned} p(-\infty, +\infty) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta x) d(\Delta x) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} d(\Delta x) = 1 \end{aligned}$$

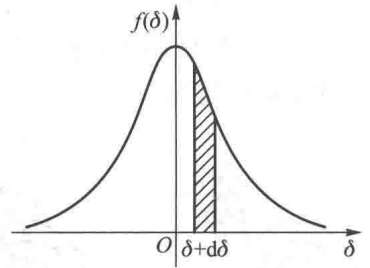


图 1.1.2 正态分布曲线

任一次测量值的误差肯定处于  $(-\infty, \infty)$  之间,如图 1.1.3 所示,这表示曲线下总面积必等于 1.所以,  $\sigma$  越小,分布曲线越陡,说明测量数据越集中;反之,数据越分散.即  $\sigma$  的大小代表了测量数据的精密程度,如图 1.1.4 所示.

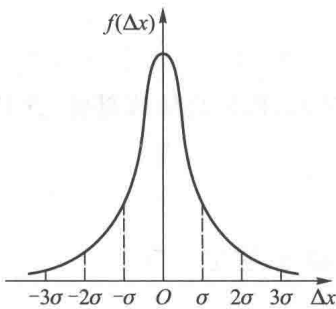


图 1.1.3  $\sigma$  的位置

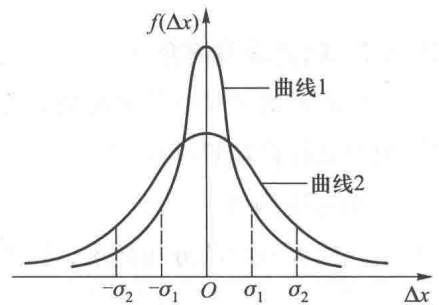


图 1.1.4  $\sigma_2 > \sigma_1$  的情形

### 3. 置信概率、置信区间、置信系数

对于正态分布,研究任一次测量的误差落在以  $\Delta x = 0$  为对称点的某个误差区间  $[-c\sigma, c\sigma]$  的概率大小,由式(1.1.1)和式(1.1.2)得

$$p[-c\sigma, c\sigma] = \int_{-c\sigma}^{c\sigma} f(\Delta x) d(\Delta x) = \int_{-c\sigma}^{c\sigma} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} d(\Delta x)$$

式中  $p$  称为置信概率,它表示误差落在区间  $[-c\sigma, c\sigma]$  的概率,换一种说法,它也表示真值落在  $[x_i - \sigma, x_i + \sigma]$  的概率,其中  $x_i$  为任一次测量值;  $[-c\sigma, c\sigma]$  称为置信区间;  $c$  称为置信系数.

从正态分布函数积分表,得到