

普通高等教育基础课规划教材

# 大学物理实验

◆ 王银峰 陶纯匡 汪涛 等编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育基础课规划教材

# 大学物理实验

王银峰 陶纯匡 汪 涛 等编著

机械工业出版社

本书是根据 2004 年教育部非物理专业物理教学指导分委员会制定的物理实验课程教学基本要求的精神,并结合重庆大学的特色编写而成的。全书共分七章,第 1 章是绪论,明确提出物理实验课程的目的的是培养学生的创新意识、创新精神和创新能力;第 2 章介绍测量误差、不确定度以及主要的数据处理方法;第 3 章介绍常用的物理实验仪器;第 4 章是开放式预备物理实验,是专门为那些在中学未做过物理实验的学生准备的;第 5 章是基本物理实验,涵盖了通常所说的力学、热学、电磁学、光学以及近代物理实验;第 6 章为综合性实验,目的在于巩固学生在基本实验阶段的学习成果,开阔眼界及思路,提高学生对实验方法和技术的综合运用能力;第 7 章是设计与研究性实验,目的在于进一步提高学生的综合实验能力与科学研究的素质。全书共 70 个实验项目,其中纳入了一些与生产实践或科研有密切联系的、具有时代气息的实验项目。

本书为理工院校各专业一二年级本科学生的物理实验教学用书,对于从事大学物理实验教学的高校教师来说,本书的部分新颖内容具有很好的参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/王银峰等编著. —北京:机械工业出版社, 2005.9

普通高等教育基础课规划教材

ISBN 7-111-17358-9

I. 大 ... II. 王 ... III. 物理学 - 实验 - 高等学校 - 教材  
IV. 04 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 103114 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:李永联 版式设计:张世琴 责任校对:李秋荣

封面设计:饶薇 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷

2005 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5 · 12.875 印张 · 502 千字

定价:33.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

大学物理实验课程是高等理工院校对学生系列科学实验基本训练的必修公共课程,也是学生接受系统实验方法与实验技能训练的开端。大学物理实验课程覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法和手段,是培养学生科学实验能力,提高科学素质的摇篮。它在激发学生创新意识以及适应科技发展的综合应用能力等方面具有其他课程不可替代的作用。因此,抓好本课程的建设对于培养国家所需的科技人才能起到事半功倍的作用。

进入 21 世纪以来,大学物理实验课程发生了很大变化,概括起来就是,本课程必须担负起培养学生创新精神、创新意识和创新能力的任务。这就要求大学物理实验课程与时俱进,对教学体系、教学内容、教学方法和教学手段进行深入的改革。

在重新审视以往教学模式的基础上,自 1999 年以来重庆大学物理实验中心对大学物理实验课程教学体系进行了重大改革,同时以世界银行贷款仪器作为硬件环境支撑,对原有实验项目内容进行整合,并对相应实验仪器进行了更新换代。本教材正是在总结近几年的工作基础上写成的。

和几年前的教材相比较,本教材将一些具有时代气息的实验项目纳入了其中,比如“扫描隧道显微镜”、“原子力显微镜的使用”、“光学信号的抽样与还原”、“计算机虚拟实验”、“数字存储示波器的使用”、“CT 实验”等;其次,本教材打破了近代物理实验与大学物理实验的界限,把一批近代物理实验融入到大学物理实验中,“如密立根油滴实验”、“光电效应”、“夫兰克-赫兹实验”、“激光倍频”、“康普顿散射”、“相对论效应的实验研究”、“声光衍射”等;另外,本教材还增加了一些与生产实践和科研有密切联系的实验,如“全息无损检测”、“光学位相滤波与透明材料位相缺陷的检测”、“单缝衍射及在现代检测中的应用”、“CCD 器件的特性及应用”、“霍尔效应及应用”等。

值得一提的是近几年来,重庆大学物理实验中心的教师在新形势下,研制开发了“IPC-205B 扫描隧道显微镜”、“IPC-208B 原子力显微镜”、“傅里叶透镜系列”、“OIP 光学信息处理系统”、“OPC-T 光学信号相关扫描仪”、“SLD 声光衍射效应仪”、“SI 智能单缝衍射测量仪”和“OEMS 光电技术实验系统”等,这些

仪器不仅为我们开出了具有时代气息的新实验项目,更主要的是使我们的综合性、设计性实验更有技术含量和底蕴。

本教材共分七章,第1章是绪论,主要介绍物理实验课程的目的和任务,以及告诉学生本课程应注意的教学环节;第2章介绍测量误差不确定度以及主要的数据处理方法,其内容为课程的重点和难点,要求学生必须掌握;第3章介绍常用的物理实验仪器,由学生自己阅读;第4章是开放式预备物理实验,共9个,是专门为那些在中学未做过物理实验的学生准备的,实验中心可专门开放一间实验室并设置相应的仪器,只要学生进行了预习,随时可以自己独立地在这里完成本章的所有实验;第5章是基本物理实验,共39个,涵盖了通常所说的力学、热学、电磁学、光学以及近代物理实验,根据专业的不同选择不同的实验项目,学生应完成本章实验项目的60%~70%;第6章为综合性实验,共13个,每一个实验均涉及两个领域以上的技术,实验目的是巩固学生在基本实验阶段的学习成果,开阔眼界及思路,提高学生对实验方法和技术的综合运用能力;第7章是设计与研究性实验,共9个,要求学生自己设计实验方案并基本独立完成实验的全过程,目的在于进一步提高学生的综合实验能力与科学研究的素质。本教材中,每个实验均对学生提出了相应要求,并且留有思考题,以提高学生对该实验的认识。另外,为了方便读者,主要实验仪器还附有相应生产单位,以便查找。

本教材是重庆大学物理实验中心教职工近几年教学改革成果的结晶。参加编著的还有韩忠、吴世春、赵艳、吴晓波、彭华、何光宏、吴芳、陈安、李田、赵及则、刘燕玲、文琼和周寅康(他们所编写的实验已在相应实验后注明)。在这里,我们还要感谢已退休的吴大华、刘振飞和童明薇等同志,他们也为本教材提供了不少素材和有益的建议。

由于我们水平有限,加之时间紧,编写工作量大,本教材中定有疏漏和不妥之处,望读者和各位同仁不吝赐教,也望海涵!

编著者

2005年6月30日

# 目 录

## 前言

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第1章 绪论 .....             | 1   |
| 1.1 物理实验课程的目的和任务 .....   | 1   |
| 1.2 物理实验课程的教学环节 .....    | 2   |
| 第2章 测量误差、不确定度和数据处理 ..... | 4   |
| 2.1 测量误差与不确定度 .....      | 4   |
| 2.2 仪器误差与估计误差 .....      | 11  |
| 2.3 测量结果的不确定度 .....      | 13  |
| 2.4 测量值的有效数字及运算规律 .....  | 21  |
| 2.5 物理实验数据处理的基本方法 .....  | 25  |
| 第3章 常用物理实验仪器 .....       | 32  |
| 3.1 长度测量器具 .....         | 32  |
| 3.2 质量称衡仪器 .....         | 36  |
| 3.3 时间测量仪器 .....         | 40  |
| 3.4 温度和气压测量仪器 .....      | 44  |
| 3.5 电磁测量仪器 .....         | 48  |
| 3.6 常用电子仪器 .....         | 72  |
| 3.7 常用光学仪器 .....         | 99  |
| 3.8 常用光源 .....           | 106 |
| 第4章 开放式预备物理实验 .....      | 109 |
| 4.1 长度的测量 .....          | 109 |
| 实验1 用常用方法测量长度 .....      | 109 |
| 实验2 用光学法测量长度 .....       | 113 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 4.2 质量的测量 .....                | 114        |
| 实验 3 用天平测量物体的质量及密度 .....       | 114        |
| 实验 4 用电子天平测量物体的密度 .....        | 116        |
| 4.3 时间的测量 .....                | 119        |
| 实验 5 机械秒表、电子秒表和智能测时仪器的使用 ..... | 119        |
| 4.4 电流的测量 .....                | 121        |
| 实验 6 电流表、电压表的使用及测量电路 .....     | 121        |
| 实验 7 电流表、电压表的改装和校准 .....       | 123        |
| 4.5 温度的测量 .....                | 127        |
| 实验 8 液体温度计的校准 .....            | 127        |
| 实验 9 冰的溶解热的测定 .....            | 130        |
| <b>第 5 章 基本物理实验 .....</b>      | <b>134</b> |
| 5.1 物性测量 .....                 | 134        |
| 实验 10 气体密度的测量 .....            | 134        |
| 实验 11 空气的比热容比测量 .....          | 136        |
| 实验 12 固体杨氏弹性模量的测量 .....        | 139        |
| 实验 13 固体切变模量的测量 .....          | 143        |
| 实验 14 液体表面张力系数的测量 .....        | 145        |
| 实验 15 液体粘度的测量 .....            | 152        |
| 实验 16 金属线胀系数的测量 .....          | 154        |
| 实验 17 液体比热容的测量 .....           | 157        |
| 实验 18 热导率的测定 .....             | 161        |
| 实验 19 物体转动惯量的测量 .....          | 164        |
| 5.2 物体运动规律的测量与研究 .....         | 169        |
| 实验 20 气轨上简谐振动的研究 .....         | 169        |
| 实验 21 计算机虚拟实验 .....            | 172        |
| 实验 22 二维碰撞运动的研究 .....          | 176        |
| 实验 23 碰撞过程的瞬态数字测量 .....        | 179        |
| 5.3 电磁实验与电磁参量测量 .....          | 185        |
| 实验 24 静电场的模拟 .....             | 185        |
| 实验 25 非线性元件伏安特性测量 .....        | 187        |
| 实验 26 用直流电桥测量电阻温度系数 .....      | 190        |
| 实验 27 用电位差计测量温差电动势 .....       | 193        |
| 实验 28 用电位差计测电表内阻和校准电表 .....    | 198        |

|              |                          |            |
|--------------|--------------------------|------------|
| 实验 29        | 灵敏电流计的研究 .....           | 200        |
| 实验 30        | 电子示波器的使用 .....           | 206        |
| 实验 31        | 铁磁材料磁化曲线与磁滞回线的测绘 .....   | 211        |
| 实验 32        | 交流电桥的使用 .....            | 216        |
| 实验 33        | 非平衡直流电桥的使用 .....         | 219        |
| 实验 34        | $RLC$ 串联电路暂态过程的研究 .....  | 222        |
| 实验 35        | 压电陶瓷的电致伸缩系数测量 .....      | 228        |
| 实验 36        | 霍尔效应及其应用 .....           | 231        |
| 实验 37        | 数字存储示波器的原理及使用 .....      | 236        |
| 5.4          | 基本常量测量 .....             | 241        |
| 实验 38        | 密立根油滴法测定基本电荷 .....       | 241        |
| 实验 39        | 光电效应法测普朗克常量 .....        | 245        |
| 5.5          | 光学实验与光学参量测量 .....        | 250        |
| 实验 40        | 透镜和透镜组参数的测量与研究 .....     | 250        |
| 实验 41        | 分光计的调整与玻璃三棱镜折射率的测量 ..... | 258        |
| 实验 42        | 等厚干涉——劈尖和牛顿环 .....       | 262        |
| 实验 43        | 迈克耳逊干涉仪 .....            | 265        |
| 实验 44        | 单缝衍射及在现代检测中的应用 .....     | 269        |
| 实验 45        | 光栅衍射 .....               | 275        |
| 实验 46        | 照相技术 .....               | 278        |
| 实验 47        | 全息摄影 .....               | 284        |
| 实验 48        | 光学信号的空间频谱与空间滤波 .....     | 288        |
| <b>第 6 章</b> | <b>综合性实验 .....</b>       | <b>294</b> |
| 6.1          | 一般综合性实验 .....            | 294        |
| 实验 49        | 传感器系列实验 .....            | 294        |
| 实验 50        | 声光衍射与液体中声速的测定 .....      | 300        |
| 实验 51        | 夫兰克-赫兹实验 .....           | 304        |
| 6.2          | 提高综合性实验 .....            | 309        |
| 实验 52        | 光学信号的抽样与还原 .....         | 309        |
| 实验 53        | 声光信息处理 .....             | 316        |
| 实验 54        | 测量方法与 B 类不确定度的分析 .....   | 321        |
| 实验 55        | 扫描隧道显微镜的使用 .....         | 324        |
| 实验 56        | 固体激光器的倍频实验 .....         | 328        |
| 实验 57        | 光学全息无损检测 .....           | 333        |

|              |                                  |            |
|--------------|----------------------------------|------------|
| 实验 58        | CT 实验——计算机层析扫描技术应用 .....         | 336        |
| 实验 59        | 康普顿散射 .....                      | 342        |
| 实验 60        | 相对论效应的实验研究 .....                 | 347        |
| 实验 61        | $\alpha$ 粒子在空气中的射程及散射截面的研究 ..... | 351        |
| <b>第 7 章</b> | <b>设计与研究性实验 .....</b>            | <b>357</b> |
| 7.1          | 初级设计性实验 .....                    | 357        |
| 实验 62        | 三用电表的设计、制作与校正 .....              | 357        |
| 实验 63        | 显微镜、望远镜的设计与组装 .....              | 363        |
| 实验 64        | 核衰变的统计规律研究 .....                 | 368        |
| 7.2          | 提高设计与研究性实验 .....                 | 374        |
| 实验 65        | 全息位相光栅的研究与制作 .....               | 374        |
| 实验 66        | 全息光学透镜的设计与制作 .....               | 379        |
| 实验 67        | 原子力显微镜的使用 .....                  | 384        |
| 实验 68        | 光学位相滤波与透明材料位相缺陷的检测 .....         | 389        |
| 实验 69        | CCD 器件的特性研究及应用 .....             | 394        |
| 实验 70        | 光学信号相关与信号识别 .....                | 399        |

# 第1章 绪 论

## 1.1 物理实验课程的目的和任务

科学实验不仅是自然科学发展的源泉，又是自然科学研究的主要手段。科学实验是人类有目的地借助一定的仪器设备，人为地控制或模拟自然对象，对自然事物及现象进行缜密、反复的观察和检测，借以探索其内在规律性的行为。这些对自然有目的、有组织、有控制的探索活动，是推动现代科学技术迅猛发展的原动力。

物理学是研究物质基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的学科。物理学的研究方法包括实验和理论这两个方面。由于物理现象的发现和解释、物理规律的揭示以及物理学理论的验证都依赖于实验，因此，物理学本质上是一门实验科学。

在物理学的发展中，人类积累了丰富的实验思想、实验方法以及实验手段。它们不但是人类文明的宝贵财富，更是人类探索未来的重要武器。

物理实验课程是高等理工科院校对学生进行系列科学实验基本训练的必修公共基础课程，是本科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。物理实验课程集力、热、电磁、声、光以及近代物理学于一体，覆盖面广，具有丰富的实验思想、方法和手段。物理实验课程，其目的既能为量大面广的本科学生提供基本实验技能训练，又能以综合性很强的近代物理实验来提高学生分析实际问题的能力，是培养学生科学实验能力、提高科学素质的重要手段。另外，它在培养大学生严肃认真、一丝不苟、实事求是的科学态度，激发学生探索自然的创新意识和理论联系实际、综合应用科技知识的能力等方面具有其他课程不可替代的作用。

本课程的具体任务是：

1. 以丰富的实验内容培养学生基本的科学实验技能，提高学生的科学实验素质，使学生初步掌握实验科学的思想和方法。

2. 培养和提高学生的科学实验能力。这些能力是：

- (1) 独立实验的能力 能够借助实验教材和有关资料，掌握实验原理及方法；正确使用仪器，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 能够融合实验原理、实验方法对实验结果进行分析、判断、归纳与综合，掌握通过实验进行物理现象和物理规律研究的基本方

法。

(3) 理论联系实际的能力 能够在实验中发现问题的、分析问题并学习解决问题的科学方法, 逐步提高综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

(4) 创新能力 能够完成符合规范要求的, 带有设计性、综合性内容的实验。本课程以具有研究性或创意性内容的实验来激发学生的学习主动性, 逐步培养学生的创新能力。

3. 培养学生的科学思维方式, 激发创新意识与激情。

4. 提高学生的科学实验素养, 培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风, 认真严谨的科学态度、积极主动的探索精神, 以及遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品德。

## 1.2 物理实验课程的教学环节

物理实验是一门在教师指导下由学生独立完成的课程。在整个实验教学过程中, 学生应该主动、自觉、创造性地获取知识和技能, 而决不是仅仅通过实验记录几个数据; 学生应通过实验探索、研究问题, 将知识转化为技能。实验教学能否达到预期的目标, 在很大程度上取决于学生自己的努力。为此, 可把物理实验课程分为如下三个阶段:

(1) 课前预习 实验能否进行, 能否获得预期的效果, 很大程度上取决于预习是否充分。因此, 每次做实验前一定要预习。预习的主要方式是阅读教材, 了解实验目的, 弄懂原理, 要测试什么, 采用什么实验方法等。对实验中使用的仪器或装置要阅读教材中有关仪器部分的介绍, 了解其使用方法和注意事项, 在此基础上撰写预习报告。预习报告内容包括: 实验名称、目的、原理、仪器和拟定的数据记录表格。

(2) 课内实验 进入实验室应遵守实验室的规章制度。实验开始时, 一般指导教师会交待有关实验和仪器的注意事项, 学生要结合自己的预习逐一领会, 特别要注意实验中容易引起失误的地方。

进行实验时, 首先是要记录主要仪器的型号、规格、精度等, 再布置、安装(或接线)和调试仪器。仪器的布置是否合理, 直接影响到操作、读数是否方便。对仪器装置进行调试(水平、垂直、正常的工作电压、光照等), 使仪器装置达到最佳工作状态。调试必须细致、耐心, 切忌急躁。要合理选择仪器的量程。如果在调试中遇到困难不能解决, 可以请教师指导(在电磁学实验中, 接线完毕后, 自己作一次检查, 再请教师检查, 确认正确无误后才能接通电源)。

调试准备就绪后, 就可进行测量。每次测量所得的原始数据要记录在自己准备好的记录表格中。要特别注意数据的有效数字和单位。注意记录实验过程

中观察到的现象，特别是观察到的异常现象，以便分析讨论。

在测量过程中要尽量保持实验条件不变，如果遇到仪器、装置出现故障，应及时请教老师，在老师的指导下力求自己动手解决。

实验完后，暂不要改变测试条件，将记录的数据请教师审阅签字，如发现错误数据时要重新进行测量。最后，整理好仪器才能离开实验室。

(3) 撰写实验报告 做完实验后应及时处理数据，撰写实验报告。实验报告是实验工作的总结，是交流实验经验和推广实验结果的媒介。因此，写实验报告应字迹清楚、文理通顺、简明扼要、图表正确。经验告诉我们，撰写实验报告是逐步培养学生分析、总结问题能力的一个重要方面。

实验报告的内容应包括：

- 1) 实验名称。
- 2) 实验者姓名，实验日期。
- 3) 实验目的：写明为什么做这个实验，要用自己的语言来写，不要照抄教材。
- 4) 实验原理：应简明扼要、文理通顺，不要照抄教材（应包括必要的计算公式、原理图、电路图或光路图等）。
- 5) 实验仪器（型号、规格、精度或最小分度值）及装置。
- 6) 实验操作步骤：按实际操作情况简明扼要地写出。
- 7) 实验数据记录：把所记录的原始数据仔细地转记下来，并尽可能列出表格，把数据处理的最后结果转记在表格内。
- 8) 数据处理：含计算、作图等，写出测量结果并进行不确定度分析。
- 9) 问题讨论：可以是影响实验结果的主要因素分析；减小误差应采取的措施；对实验中观察到的现象（特别是异常现象）的解释；改进实验的建议和心得体会；回答实验的思考题等。

## 第2章 测量误差、不确定度和数据处理

### 2.1 测量误差与不确定度

#### 2.1.1 测量

在科学实验中，一切物理量都是通过测量得到的。所谓测量，就是将待测物理量与规定作为标准单位的同类物理量（或称为标准量）通过一定方法进行比较。测量中的比较倍数，即为待测物理量的测量值。测量可分为两类：一类是用已知的标准单位与待测量直接进行比较，或者从已用标准量校准的仪器仪表上直接读出测量值（例如，用米尺量得物体的长度为0.7300m，用停表测得单摆周期为1.05s，用毫安表读出电流值为12.0mA等），这类测量称直接测量（或称简单测量）；另一类测量，它不能直接把待测量的大小测出来，而是依据该待测量和一个或几个直接测得量的函数关系求出该待测量（例如，测量铜圆柱体的密度时，首先用游标卡尺或千分尺测出它的高 $h$ 和直径 $d$ ，用天平称出它的质量 $m$ ，然后再通过函数关系式 $\rho = 4m/\pi d^2 h$ 计算出铜的密度 $\rho$ ），把这类测量称为间接测量（或称复合测量）。

一般地说，大多数测量都是间接测量。但随着科学技术的发展，很多原来只能以间接测量方式来获得的物理量，现在也可以直接测量了。例如电功率的测量，现在可用功率表直接测量。又如速度也可用速率表来直接测量等。

测得的数据（即测量值）不同于数学中的一个数值，它是由数值和单位两部分组成的。一个数值有了单位，便具有了一种特定的物理意义，这时它才可以称为一个物理量。因此，在实验中经测量所得的值（数据）应包括数值和单位，二者缺一不可。

#### 2.1.2 误差

任何物质都有自身的特性。反映这些特性的物理量所具有的客观真实数值称为这些物理量的真值。测量的目的就是要力求得到真值。但测量总是依据一定的理论和方法，使用一定的仪器，在一定的环境中由一定的人进行的。在测量过程中，由于受到测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员的水平以及种种因素的限制，使测量结果与客观存在的真值不可能完全相同，导致所测得的只能是该物理量的近似值。也就是说，任何一种测量结果的测量值与客观存在

的真值之间总会或多或少地存在一定的差值,这种差值称为该测量值的测量误差(又称测量值的绝对误差),简称“误差”,即

$$\text{测量值}(x) - \text{真值}(X) = \text{误差}(\epsilon) \quad (2.1-1)$$

误差存在于一切测量之中,而且贯穿测量过程的始终。每使用一种仪器进行测量都会引起误差。测量所根据的方法和理论越繁多,所用仪器越复杂,所经历的时间越长,则引进误差的机会就越多。因此,实验应该根据要求和误差限度来制订或选择合理的方案和仪器。要避免测量中某个环节盲目追求不实际的高指标,因这样做既不符合现代信息论的基本思想,又提高了测量的代价。一个优秀的实验工作者,应该是在一定的要求下,以最低的代价来取得最佳的结果。要做到既保证必要的实验精确度,又合理地节省人力与物力。

### 2.1.3 误差的分类及相关知识

误差的产生原因是多方面的。根据误差的性质和来源,可将误差分为两类:系统误差和随机误差。现分别对它们作必要的介绍。

#### 1. 系统误差

在同一实验条件下(方法、仪器、环境和观测人都不变)多次测量同一量时,误差的绝对值和正负号保持不变,或按一定规律变化的误差,称为系统误差。系统误差的特征是它的确定性。它主要来自以下几个方面:

1) 理论(方法)误差:这是由于测量所依据的理论公式本身的近似性,或实验条件不能达到理论公式所规定的要求,或由于所采用测量方法或数据不完善而引起的误差。例如,单摆的周期公式  $T = 2\pi \sqrt{l/g}$  的成立条件是摆角趋近于零,这实际上是达不到的,用它来计算周期必然引起误差。

2) 仪器误差:这是由于测量仪器本身的固有缺陷或没有按规定使用而引起的。例如,用未经校准零位的千分尺测量零件长度,用不等臂的天平称衡物体的质量,都会引入仪器误差。

3) 环境误差:由于环境条件变化所引起的误差,如温度、气压、湿度的变化等。

4) 个人误差:这是由于观测人的生理或心理因素所造成的。它通常与观测人员反应速度和观测习惯有关。例如,用肉眼在米尺刻线上读数时,习惯地偏向一个方向;按动秒表时,习惯地提前或滞后等。

系统误差的规律及产生的原因可能是实验者已知的,也可能不知道。已被确切掌握了其大小和符号的系统误差称为可定系统误差。对大小和方向未知(或尚未确定)的系统误差称为未定系统误差。前者一般可在测量中采取一定的措施给予减小、消除,或在测量结果中进行修正,而后者一般难以作出修正,只能估计它的取值范围。

总之,系统误差是在一定实验条件下由一些确定的因素引起的,它使测量结果总是偏向一边,即偏大或偏小。因此,试图在相同条件下用增加测量次数来减小或消除它是徒劳的,只有找出导致该系统误差产生的原因,对症下药,采取一定的方法,才能减小或消除它的影响,或对测量结果进行修正。

(1) 系统误差的发现 要发现系统误差,就必须仔细地研究测量理论和方法的每一步推导,检验或校准每一件仪器,分析每一个因素对实验的影响等。下面从普遍意义上介绍几种发现系统误差的途径和方法。

#### 1) 对比的方法

① 实验方法的对比。用不同方法测同一个量,看结果是否一致。如用一个单摆测量重力加速度  $g = 9.80 \pm 0.01 \text{ m/s}^2$ , 用复摆测得  $g = 9.830 \pm 0.003 \text{ m/s}^2$ , 用自由落体法测得  $g = 9.7763 \pm 0.0005 \text{ m/s}^2$ , 三者结果不一致,这说明至少其中两种方法存在系统误差。

② 仪器的对比。如用两个电流表串联于同一个电路中,读数不一致,则说明至少有一个电流表不准。如果其中一个为标准表,就可以找出另一个的修正值了。

③ 改变测量方法。例如,把电流反向进行读数;在增加砝码过程中与减少砝码过程中读数;分光计测角盘转  $180^\circ$  读数等。

④ 改变实验中某些参量的数值。例如,改变电路中电流的数值,如果测量结果单调或有规律地变化,则说明有某种系统误差存在。

⑤ 改变实验条件。例如在电路中将某个元件的位置变动一下。

⑥ 两个人对比观测,可发现个人误差,等等。

#### 2) 理论分析的方法

① 分析测量所依据的理论公式所要求的条件与实际情况有无差异。如在“单摆”实验中,公式  $T = 2\pi \sqrt{l/g}$ , 这是做了  $\theta \approx 0$  的近似,公式把摆球看作质点,忽略了摆线质量、空气浮力与阻力等。

② 分析仪器是否达到了所要求的使用条件。例如用测高仪测物体高度时,要求支架垂直、望远镜平移,否则测出的结果不能反映物体实际高度。

3) 分析数据的方法:测量所得数据明显不服从统计分布规律时,则可将测量数据依次排列,如偏差大小有规则地向一个方向变化,则测量中存在线性系统误差;如偏差符号作有规律交替变化,则测量中存在周期性系统误差。

(2) 系统误差的消除和修正 从原则上来说,消除系统误差的途径,首先是设法使它不产生,如果做不到,那么就修正它,或在测量中设法抵消它的影响。下面介绍几种消除系统误差的途径:

#### 1) 消除产生系统误差的根源

① 采用符合实际的理论公式。

② 消除仪器的零位误差。例如,在使用千分尺之前,要先检查零位,并记下零读数(即零位误差),以便对测量值进行修正;又如电表的指针在未通电时不指零位,可进行机械校零或记下零读数,最后再对测量值进行修正。

③ 保证仪器装置及测量满足规定的条件。

④ 采用某种方法(如比较法),在公式中消去某个量,就可能避免它的系统误差。例如在测定液体的比热容实验中,若能保证两个量热器系统完全相同,升温也相同,就能消除因散热而引起的系统误差。

2) 找出修正值,对测量结果进行修正

① 用标准仪器校准一般仪器,得出修正值或校准曲线。如经长期使用过的电表、电阻箱在使用前必须经过校准或得出校准曲线。

② 对理论公式进行修正,找出修正值。例如,用单摆测周期  $T = 2\pi \sqrt{l/g}$  时,若考虑摆球的体积大小及空气的浮力和阻力,则此公式必须修正。

3) 从测量方法上或仪器设计上抵消系统误差影响

① 对称测量可以抵消系统误差的影响。例如,在分光计上读出刻度盘相隔  $180^\circ$  处的两组数据,以消除偏心差。

② 保持实验或仪器一定,可抵消某种系统误差。例如  $m = m_1 - m_0$ , 测量  $m_1$  及  $m_0$  时用同一个砝码可以抵消砝码的系统误差。

③ 线性观测法可抵消某种线性变化的系统误差。例如,电源电动势随时间线性降低,则使用电位差计时可隔相等时间轮流测标准量和待测量,如第一、三次测标准量,将其平均值与第二次所测的待测量对应。

④ 周期性系统误差的消除。对按正弦规律变化的周期性系统误差,可采取在每半个周期进行偶数次测量的方法予以消除。

在实际工作中,有时系统误差的大小不易确定或不必要精确计算,这时只需判断它的正负和估计它的数量级就行了。如其中有些误差对测量结果无影响,就可不予考虑了,这对实际工作很有意义。

## 2. 随机误差

若系统误差已经减弱到可以忽略的程度,被测量本身又是稳定的,在同一条件下对该物理量进行多次测量时,测量值总有稍许差异,而且大小和方向变化不定。这种数值大小和正负号经常变化的误差称为“随机误差”。随机误差主要来自以下几方面:

1) 主观方面:由于人们的感官灵敏度和仪器的精度有限,实验者对操作不熟练,估计读数不准等。

2) 客观方面:外界环境干扰,如温度的微小起伏、气流扰动、振动、杂散电磁场的不规则脉动等,既不能消除,又无法估量。

3) 其他不可能预测的次要因素。

从随机误差的定义和来源可知,它是实验过程中各种随机的或不确定因素的微小变化引起的。它的显著特点是在任意一次测量之前无法事先知道它的大小和方向。鉴于此,有必要对它进行深入的讨论。

(1) 测量列的算术平均值 在深入讨论随机误差问题时,可假定系统误差已经被消除或减小到可忽略的地步。

在相同条件下(即等精度)对某一物理量进行  $K$  次测量,其测量值为  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ , 算术平均值为  $\bar{x}$ , 则

$$\bar{x} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x_i \quad (2.1-2)$$

根据统计误差理论,在一组  $K$  次测量的数据中,算术平均值最接近于真值,称为测量的“最佳值”。当测量次数  $K \rightarrow \infty$ ,  $\bar{x} = X$  (真值)。

测量次数的增加对于提高算术平均值的可靠性是有利的,但不是测量次数越多越好。因为增加测量次数必定延长测量时间,这样给保持稳定的测量条件增加困难,还可能引起大的观测误差。另外,增加测量次数对系统误差的减小不起作用,所以实验测量次数不必过多。一般在科学研究中,取 10~20 次,而在物理教学实验中,通常取 6~10 次。

(2) 测量列的标准误差 如前所述,随机误差其大小和方向都不能预知,但在等精度条件下,对物理量进行足够多次的测量,就会发现测量的随机误差是按一定的统计规律分布的,而最典型的分布就是正态分布(高斯分布)。

典型的正态分布如图 2.1-1 所示。图中  $\epsilon$  为绝对随机误差(绝对误差),  $f(\epsilon)$  为概率密度函数,  $\sigma$  为标准误差。

由概率论知识可以证明

$$f(\epsilon) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\epsilon^2/2\sigma^2} \quad (2.1-3)$$

其中  $\sigma$  被定义为测量列的标准误差。 $\sigma$  可表示为

$$\sigma = \lim_{K \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (x_i - X)^2} = \lim_{K \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \epsilon_i^2} \quad (2.1-4)$$

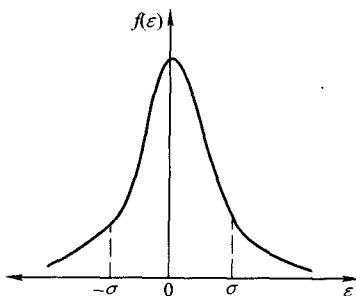


图 2.1-1 随机误差分布曲线

(3) 随机误差的特点 具有正态分布的随机误差具备以下特点:

1) 有界性: 绝对值很大的误差出现的概率为零,即误差的绝对值不会超过一定的界限。

2) 单峰性: 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。