



# 大学物理实验 新教程

DAXUE WULI SHIYAN XINJIAOCHENG

王廷志 主编



苏州大学出版社  
Soochow University Press

# 大学物理实验新教程

主编 王廷志

苏州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验新教程 / 王廷志主编. — 苏州: 苏州大学出版社, 2015. 12  
ISBN 978-7-5672-1565-8

I. ①大… II. ①王… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 276989 号

大学物理实验新教程

王廷志 主编

责任编辑 周建兰

---

苏州大学出版社出版发行

(地址: 苏州市十梓街 1 号 邮编: 215006)

宜兴市盛世文化印刷有限公司印装

(地址: 宜兴市万石镇南漕河滨路 58 号 邮编: 214217)

---

开本 787 mm×1 092 mm 1/16 印张 19.25 字数 480 千

2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5672-1565-8 定价: 37.00 元

---

苏州大学版图书若有印装错误, 本社负责调换

苏州大学出版社营销部 电话: 0512-65225020

苏州大学出版社网址 <http://www.sudapress.com>

# 前

# 言

本书是根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会 2008 年颁布的《理工类大学物理实验课程基本要求》的精神,结合我校物理实验的实际情况,总结我校多年来物理实验教学改革和课程建设实践的基础上编写而成的。

学生在学习物理实验课程时,主要面临两大问题:第一是看不懂实验教材、看不到实验器材,第二是从中学不到创新思想。本书力求在以上两点取得突破。本书的创新点如下:第一,在实验内容部分,除给出原理图外,还给出实物图,用图文并茂的方式讲明实验内容及操作技巧;第二,在知识拓展部分,主要讲述与该实验有关的科学家传记、历史背景、创新过程,力求将物理学史融入具体的实验之中。显然,第一点创新主要是让学生看懂教材,第二点创新则是让学生开阔视野、陶冶情操,从中学到如何做人、如何学习、如何生活、如何创新。

全书共分为六章:第 1 章重点介绍物理实验的基本知识,包括测量误差、测量结果的不确定度评定和实验数据处理的基本方法;从第 2 章到第 6 章依次为:基础性实验、提高性实验、研究性实验、科研训练实验和实验拓展。从第 2 章到第 4 章共介绍了 27 个不同层次的大学物理实验,在一些实验后面附有相应的设计性实验,每个实验按实验目的、实验仪器、实验原理、实验内容、实验数据记录及处理、知识拓展等顺序编写。第 5 章是科研训练实验,主要介绍了实验中心一些教师的科研方向,希望有科研兴趣的同学及时联系相关教师,早日进入科研实战状态,将科研训练、毕业设计及进一步深造的方向规划为一个目标链,使自己的科研沿着一个主方向向纵深发展。第 6 章是实验拓展,主要介绍基于现有实验基础上的一些研究,使同学们在做了相关实验后,从中学到一些科研思路。附录 1 给出了第 1 章习题的参考答案,附录 2 列出了常用的物理实验参数,以方便读者查阅。

本书由王廷志、史苏佳、陈健、朱纯、聂延光、叶恩钾、刘诚、谢广喜、张成亮、史海峰编写。其中,前言,实验 8、10、11、12、14、16、25、26、33,实验拓展 4、5、6 由王廷志编写;绪论,第 1 章的 3、4 节,实验 1、5、7、9、13、18、34、24、27 以及附录 1 由史苏佳编写;第 1 章的 1、2 节,实验 2、15、19、21 以及实验拓展 1、2、3、9 由陈健编写;实验 6、17、20、30 和附录 2 由朱纯编写;实验 3、22 由聂延光编写;实验 4、23、31 由叶恩钾编写;实验拓展 7、8 由谢广喜编写;实验 32 由刘诚编写;实验 28 由张成亮编写;实验 29 由史海峰编写;全书由王廷志统稿和修改定稿。本书在编写过程中,参阅了我校历年编写的物理实验教材、讲义和许多兄弟院校的教材及网上的相关资料,得到了江南大学理学院领导和物理实验中心全体人员的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加上时间仓促,书中还有不完善和需要改进之处,恳请广大读者和同行专家批评指正。

编者

2015 年 9 月于江南大学



|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 绪论 .....                          | 1   |
| 第 1 章 误差理论与实验数据处理 .....           | 7   |
| 第 1 节 测量与误差 .....                 | 7   |
| 第 2 节 测量结果的不确定度评定 .....           | 12  |
| 第 3 节 有效数字及运算规则 .....             | 17  |
| 第 4 节 实验数据处理的基本方法 .....           | 21  |
| 练习题 .....                         | 29  |
| 第 2 章 基础性实验 .....                 | 30  |
| 实验 1 长度测量 .....                   | 30  |
| 实验 2 金属杨氏弹性模量的测定 .....            | 37  |
| 实验 3 二极管伏安特性的测定 .....             | 44  |
| 实验 4 电桥法测铜电阻温度系数 .....            | 55  |
| 实验 5 示波器的使用 .....                 | 61  |
| 实验 6 磁感应强度的测定 .....               | 72  |
| 实验 7 薄透镜焦距的测定 .....               | 77  |
| 实验 8 牛顿环干涉 .....                  | 84  |
| 实验 9 分光计的调节与使用 .....              | 91  |
| 实验 10 迈克耳孙干涉仪的调节与使用 .....         | 102 |
| 第 3 章 提高性实验 .....                 | 108 |
| 实验 11 箱式电位差计的使用及热电偶温差电动势的测定 ..... | 108 |
| 实验 12 双光束干涉测光波波长 .....            | 116 |
| 实验 13 衍射光栅常数和谱线波长的测定 .....        | 122 |
| 实验 14 声速的测定 .....                 | 127 |
| 实验 15 碰撞打靶研究抛体运动 .....            | 132 |
| 实验 16 利用光电效应法测普朗克常数 .....         | 138 |
| 实验 17 模拟电冰箱制冷系数的测量 .....          | 146 |
| 实验 18 音频信号光纤传输技术实验 .....          | 151 |
| 实验 19 液晶电光效应实验 .....              | 161 |

|                                                    |     |
|----------------------------------------------------|-----|
| 第 4 章 研究性实验 .....                                  | 171 |
| 实验 20 波尔共振实验 .....                                 | 171 |
| 实验 21 夫兰克-赫兹实验 .....                               | 180 |
| 实验 22 电子顺磁共振实验 .....                               | 188 |
| 实验 23 扫描 Fabry-Perot 干涉仪及其在塞曼效应等高分辨率光谱检测中的应用 ..... | 194 |
| 实验 24 电子束(比荷测量)实验 .....                            | 208 |
| 实验 25 磁悬浮动力学基础及碰撞(Z、N)设计性实验 .....                  | 224 |
| 实验 26 多普勒效应的研究与应用 .....                            | 235 |
| 实验 27 转动惯量与切变模量的测量 .....                           | 247 |
| 第 5 章 科研训练实验 .....                                 | 255 |
| 实验 28 磁性相变功能材料研究 .....                             | 255 |
| 实验 29 半导体光催化研究及实验 .....                            | 258 |
| 实验 30 基于荧光光谱分析的食品安全检测 .....                        | 262 |
| 实验 31 低维纳米材料器件中的电子输运 .....                         | 264 |
| 实验 32 PIE 成像技术 .....                               | 266 |
| 实验 33 创新实验室与专利申请 .....                             | 267 |
| 第 6 章 实验拓展 .....                                   | 271 |
| 实验拓展 1 物理实验常用的基本测量方法 .....                         | 271 |
| 实验拓展 2 分光计的等距离调节法 .....                            | 276 |
| 实验拓展 3 关于牛顿环调整的误差考虑 .....                          | 277 |
| 实验拓展 4 分光计的调节技巧 .....                              | 278 |
| 实验拓展 5 光电效应实验对原创能力的培养 .....                        | 280 |
| 实验拓展 6 磁感应强度的测定实验对原创能力的培养 .....                    | 284 |
| 实验拓展 7 类比——创造性思维的起点 .....                          | 287 |
| 实验拓展 8 从可测量函数观点理解大学物理实验模型的理论建构 .....               | 288 |
| 实验拓展 9 一体型激光杨氏模量测定仪 .....                          | 290 |
| 附录 1 第 1 章练习题参考答案 .....                            | 293 |
| 附录 2 物理实验常用数据 .....                                | 293 |
| 参考文献 .....                                         | 299 |

### 一、物理实验课程的任务

物理实验是高等学校对学生进行科学实验基本训练的重要基础课程,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端.物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,是各学科科学实验的基础.

物理实验课程覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、手段,同时能提供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、提高科学素质的重要基础.它在培养学生严谨的科学态度、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.

本课程的具体任务是:

1. 培养学生科学实验技能,提高学生科学实验素质,使学生初步掌握科学实验的思想和方法,培养科学思维和创新意识,提高学生发现问题、分析问题和解决问题的能力.
2. 提高学生科学素养,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,遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品质.

### 二、实验教学的基本要求

物理实验教学的基本要求如下:

1. 掌握测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的基本能力.
  - (1) 掌握测量误差与不确定度的基本概念,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一些常用方法,包括列表法、作图法、逐差法和最小二乘法等,学习使用计算机通用软件处理实验数据.
2. 掌握基本物理量的测量方法,了解数字化测量技术在物理实验中的应用.

例如,长度、质量、时间、温度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、光强度、折射率、电子电荷、普朗克常量等常用物理量及物理参数的测量.
3. 了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用.

例如,比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法和干涉、衍射法,以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法.
4. 掌握实验室常用仪器的性能,并能够正确使用.

例如,长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光仪、光谱仪、常用电源和光源等仪器.



### 5. 掌握常用的实验操作技术.

例如,零位调整、水平/铅直调整、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.

### 6. 了解物理实验史和物理实验在现代科学技术中的应用知识.

## 三、能力培养的基本要求

通过物理实验课程的学习,重点培养以下几方面的能力:

#### 1. 独立实验的能力.

能够通过阅读实验教材、查询有关资料和思考问题,掌握实验原理与方法,理解实验思想与设计思路.正确使用仪器设备,独立完成实验内容.科学观测实验现象,正确记录和处理实验数据,科学表达实验结果,撰写合格的实验报告,逐步形成自主实验的基本能力.

#### 2. 分析与研究的能力.

能够融合实验原理、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.掌握通过实验进行物理现象和物理规律研究的基本方法,培养基本的实验分析与研究能力.

#### 3. 理论联系实际的能力.

能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题,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. 实验创新能力.

能够完成符合规范要求的设计性、综合性实验,进行初步的实验研究与设计,增强学习的主动性和创新意识,逐步培养实验创新能力.

## 四、实验课程的具体要求

物理实验课程要求学生在教师指导下独立完成每次的实验任务,具体要求做好以下几方面的工作:

#### 1. 课前预习.

提前做好实验预习工作,仔细阅读实验教材,明确实验目的,理解实验原理,了解实验内容和步骤,了解实验仪器的使用方法,明确实验要测量哪些物理量、如何测量,设计实验数据表格,在预习的基础上撰写实验预习报告.

每次实验前指导教师检查学生预习情况,合格后方可进行实验.对未认真预习的学生可做适当处理,直至取消其实验资格.

#### 2. 课堂实验.

按课表规定或预约的时间进行实验,不得无故缺席或迟到、早退.

严格遵守实验操作规程和注意事项,以科学的态度独立完成实验.

上实验课应携带文具、计算器、草稿纸、作图纸等必要的实验用具.实验过程中保持良好的实验环境,不大声讲话,注意环境卫生.爱护仪器设备,注意实验安全,不得擅自搬弄、拆卸仪器.如有违规操作造成人为损坏的,照章赔偿.

实验前,合理安排好仪器的位置,需要经常调整和测量的仪器一般置于近处,以方便操作和读数.

实验时,首先对仪器进行必要的调整,如水平调节、垂直调节、零位调节、量程选择等.实验过程中遇到问题或故障,应自己动脑分析,力求自我排除.经努力不能自行解决的问题



可报告指导教师协助解决。

测量时,仔细观察实验现象,将数据整齐记录在数据表格中,特别注意有效数字。

测量结束后,请教师检查实验数据,如有错误或遗漏,须重做或补做。原始数据经教师审查签字,并整理好仪器设备、将桌面和凳子收拾整齐后方可离开实验室。

### 3. 撰写实验报告。

按照一定的格式和要求表达实验过程和结果的文字材料称为实验报告。它是实验工作的全面总结和系统概括,是实验工作中不可缺少的一个环节。写实验报告的过程,是对所测取的数据加以处理,对所观察的现象加以分析并从中找出客观规律和内在联系的过程。因此,书写实验报告,对于理工科大学学生来讲,是一种必不可少的基础训练,同时也是培养学生将来从事科学研究和工程技术开发论文书写的基础,同学们应认真对待。书写实验报告要使用统一规格的实验报告纸,要求字迹端正、文字通顺、内容简明扼要、数据记录整洁、图表规范、结果正确、讨论认真。

一份完整的实验报告通常包括下述内容:① 实验名称;② 实验目的;③ 实验原理;④ 实验仪器设备;⑤ 实验内容及步骤;⑥ 数据记录及处理;⑦ 小结或讨论;⑧ 原始实验数据草表。该表作为附件附在实验报告后面,交实验报告时一并交给指导老师。

#### (1) 实验名称。

实验报告的名称,又称标题,列在报告的最前面。实验名称应简洁、鲜明、准确。字数要尽量少,一目了然,能恰当反映实验的内容。

#### (2) 实验目的。

实验目的,通常教材都给予明确阐述,但在具体实验过程中,有些内容并不进行,或实验内容做了改变。因此,不能完全照搬书本,应按课堂要求并结合自己的体会来写,简明扼要地说明为什么要进行本实验,实验要解决什么问题。

#### (3) 实验原理。

在理解的基础上,用简短的文字扼要地阐述实验原理,切忌整篇照抄,力求做到图文并茂。具体要求如下:

① 画出必要的电路图、光路图或实验装置示意图,如图不止一张,应依次编号。

② 必须有简明扼要的语言文字叙述,用自己的语言进行归纳阐述,文字务必清晰、通顺。

③ 写明实验所用的公式及简要的推导过程,说明式中各物理量的意义和单位以及公式的适用条件。

#### (4) 实验仪器设备。

每一个实验中用到的仪器设备是根据实验内容的要求来配置的,在书写这部分内容时应根据实验的实际情况如实记录仪器的名称、型号、规格和数量,不要照抄教材。电磁学实验中普通连接导线不必记录,写上导线若干即可,但特殊的连接电缆必须注明。

#### (5) 实验内容及步骤。

简明扼要地写出实验的主要内容,根据实际操作程序,按时间的先后划分为几个步骤,并在前面标上1、2、3……使实验内容条理清晰。

#### (6) 数据记录及处理。

数据记录是将实验过程中记录在原始数据记录表格里、从测量仪表所读取的实验数据重新整理填入画好的数据表格。

数据处理是把测量所得的原始数据根据不确定度的估算、测量结果的表示方法以及数据处理的基本方法来进行处理。例如,采用作图法、图解法时,根据作图法的要求,画出相关的曲线后再求解。

#### (7) 小结或讨论。

这部分内容不限,可以从理论上对实验结果进行客观的评价,对实验中出现的异常现象进行讨论,分析误差的大小和产生的原因以及如何提高测量精度,指出实验中存在的问题,总结实验的收获或心得体会,回答问题等。

### 附: 实验报告范例

#### 一、实验名称

衍射光栅常数和谱线波长的测定。

#### 二、实验目的

1. 进一步掌握分光计的调节和使用方法。
2. 观察光栅衍射现象,测定光栅常数和汞原子光谱的部分谱线的波长。

#### 三、实验原理

如图1所示,根据夫琅和费的衍射理论,当一束平行单色光垂直入射到光栅面上时,光通过每个狭缝都发生衍射,所有狭缝的衍射光又彼此产生干涉。相邻两狭缝对应点射出的光线到达  $P$  的光程差为  $\Delta = d \sin \varphi_k$ , 当此光程差等于入射光波长  $\lambda$  的整数倍时,多光束干涉使光振动加强,则产生一明条纹。光栅衍射产生明条纹的条件为

$$d \sin \varphi_k = k\lambda, \quad k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

式(1)称为光栅衍射方程。若已知某一条光谱线的波长为  $\lambda$ , 测出该光谱线第  $k$  级明条纹对应的衍射角为  $\varphi_k$ , 便可计算出所使用光栅的光栅常数  $d$ 。反过来也可以用此式计算波长  $\lambda$ 。

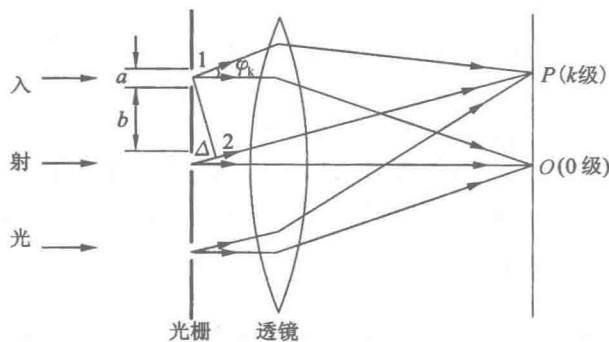


图 1

#### 四、实验仪器

JJY-1 型分光计、复制光栅、汞灯各 1 件。

#### 五、实验内容和步骤

1. 按图1,将光栅放置在分光计平台中央,使平台调平螺丝  $B_1$ 、 $B_2$  的连线与光栅面垂直,以光栅面作为反射面,用自准直法和各半调节法使望远镜只能接受平行光,望远镜光轴与分光计主轴垂直。

2. 开启汞灯照亮平行光管的狭缝,将望远镜转至对准平行光管狭缝处,以望远镜为基

准,使狭缝像于望远镜的中央,松开狭缝装置锁紧螺丝,前后伸缩狭缝装置,使狭缝像边缘清晰;旋转狭缝装置,使狭缝像竖直;调狭缝宽度螺丝,使狭缝像尽量细狭,但中间不要出现断痕。

3. 为了使平行光管发出的平行光垂直入射到光栅平面上,可使望远镜对准平行光管,转动望远镜,使零级明条纹与望远镜中分划板上竖直叉丝重合,调节平行光管下倾斜螺丝,使零级明条纹被望远镜中分划板上水平叉丝平分,这时平行光管发出的平行光垂直照射光栅;然后转动平台,使反射十字像落在望远镜分划板叉丝的上方交点处,此时望远镜光轴垂直于光栅平面。

4. 转动望远镜,观察汞灯发出的衍射光谱的分布情况,在中央零级明条纹的两边,对称地排列 $\pm 1$ 级和 $\pm 2$ 级光谱线组,如左右谱线有高低,是因为光栅上的刻痕与转轴不平行,可调节平台调平螺丝 $B_3$ 使全部谱线高低一致。

5. 依次测出 $-1$ 级和 $+1$ 级的绿、蓝、黄<sub>1</sub>、黄<sub>2</sub>谱线的各方位角 $\theta_{+1}$ 和 $\theta_{-1}$ 。

## 六、数据记录及处理

### (一) 数据记录

实验数据记录如表1所示。

表 1

|                    |      | $\theta_{+1}$    | $\theta_{-1}$    | $ \varphi_1 $   | $ \bar{\varphi}_1 $ |
|--------------------|------|------------------|------------------|-----------------|---------------------|
| 汞紫谱线               | 左窗读数 | $286^{\circ}20'$ | $256^{\circ}16'$ | $15^{\circ}2'$  | $15^{\circ}2'$      |
|                    | 右窗读数 | $106^{\circ}21'$ | $76^{\circ}18'$  | $15^{\circ}2'$  |                     |
| 汞绿谱线               | 左窗读数 | $290^{\circ}22'$ | $252^{\circ}19'$ | $19^{\circ}2'$  | $19^{\circ}2'$      |
|                    | 右窗读数 | $110^{\circ}23'$ | $72^{\circ}20'$  | $19^{\circ}2'$  |                     |
| 汞黄 <sub>1</sub> 谱线 | 左窗读数 | $291^{\circ}28'$ | $251^{\circ}10'$ | $20^{\circ}9'$  | $20^{\circ}9'$      |
|                    | 右窗读数 | $111^{\circ}29'$ | $71^{\circ}11'$  | $20^{\circ}9'$  |                     |
| 汞黄 <sub>2</sub> 谱线 | 左窗读数 | $291^{\circ}29'$ | $251^{\circ}9'$  | $20^{\circ}10'$ | $20^{\circ}10'$     |
|                    | 右窗读数 | $111^{\circ}30'$ | $71^{\circ}10'$  | $20^{\circ}10'$ |                     |

### (二) 数据处理

#### 1. 计算光栅常数 $d$ 。

已知汞绿谱线的波长 $\lambda=546.1\text{ nm}$ ,则光栅常数

$$d = \frac{\lambda}{\sin \bar{\varphi}_{1\text{绿}}} = \frac{546.1}{\sin 19^{\circ}2'} \text{ nm} = 1\,674.5\text{ nm}$$

2. 计算汞紫谱线、汞黄<sub>1</sub>谱线、汞黄<sub>2</sub>谱线的波长,并计算测量值和标准值之间的百分误差 $E$ 。

$$(1) \lambda_{\text{紫测}} = d \sin \bar{\varphi}_{1\text{绿}} = 1\,674.5 \times \sin 15^{\circ}2' \text{ nm} = 434.3\text{ nm}$$

已知 $\lambda_{\text{紫标}} = 435.1\text{ nm}$ ,则

$$E_{\text{紫}} = \frac{|\lambda_{\text{紫测}} - \lambda_{\text{紫标}}|}{\lambda_{\text{紫标}}} \times 100\% = \frac{|434.3 - 435.1|}{435.1} \times 100\% = 0.18\%$$

$$(2) \lambda_{\text{黄}_1\text{测}} = d \sin \bar{\varphi}_{1\text{黄}_1} = 1\,674.5 \times \sin 20^{\circ}9' = 576.8\text{ nm}$$



已知  $\lambda_{\text{黄}_1 \text{标}} = 577.0 \text{ nm}$ , 则

$$E_{\text{黄}_1} = \frac{|\lambda_{\text{黄}_1 \text{测}} - \lambda_{\text{黄}_1 \text{标}}|}{\lambda_{\text{黄}_1 \text{标}}} \times 100\% = \frac{|576.8 - 577.0|}{577.0} \times 100\% = 0.035\%$$

$$(3) \lambda_{\text{黄}_2 \text{测}} = d \sin \varphi_{1\text{黄}_2} = 1\,674.5 \times \sin 20^\circ 10' \text{ nm} = 577.3 \text{ nm}$$

已知  $\lambda_{\text{黄}_2 \text{标}} = 579.0 \text{ nm}$ , 则

$$E_{\text{黄}_2} = \frac{|\lambda_{\text{黄}_2 \text{测}} - \lambda_{\text{黄}_2 \text{标}}|}{\lambda_{\text{黄}_2 \text{标}}} \times 100\% = \frac{|577.3 - 579.0|}{579.0} \times 100\% = 0.29\%$$

七、原始实验数据草表

略。

# 第 1 章

## 误差理论与实验数据处理

大学物理实验中,除了要定性地观察各种物理现象外,还要定量地测量相关物理量,并通过对实验数据的具体分析和处理,得出确切的实验结论.因此,误差理论与实验数据处理是物理实验的必备基础,也是实验工作者必须掌握的基本知识和开展科学实验的前提.

本章重点介绍误差理论与实验数据处理的基本知识,包括测量与误差、测量结果的不确定度评定、有效数字和运算规则以及实验数据处理的基本方法.

### 第 1 节 测量与误差



#### 测量及其分类

##### 一、测量

所谓测量,是指用一定的计量工具或仪器,通过实验的方法,直接或间接地与被测对象进行比较,从而获得测量结果的过程.测量是物理实验的重要内容和基本手段,是获得实验数据的必要途径.一个物理量的完整测量结果包括该物理量的数值、单位以及结果的可信程度(用不确定度表示).

##### 二、测量的分类

###### 1. 直接测量与间接测量.

按测量手段的不同,可将测量分为直接测量与间接测量.

直接测量是用测量仪器直接获得测量结果的测量.例如,用米尺测身高,用秤测物体质量,用秒表测单摆的摆动周期,用电压表测电压等.直接测量是物理实验中最基本、最常见的一种测量方式.

间接测量是借助待测量与其他物理量之间的函数关系,由直接测量的物理量经过计算间接获得的测量.例如,在用伏安法测电阻实验中,测出电阻两端的电压  $U$  和流过电阻的电流  $I$ ,依据欧姆定律  $R = \frac{U}{I}$ ,求出待测电阻  $R$ .这里的电压  $U$ 、电流  $I$  是直接测量量,而电阻  $R$  是间接测量量.



有些物理量既可以直接测量,也可以间接测量,这主要取决于测量条件、测量要求、测量方法和使用的仪器。例如,我们可以用伏安法间接测量电阻,也可以用万用表的电阻挡直接测量电阻。直接测量是一切测量的基础。随着科学技术的发展和测量仪器的开发,很多原来只能间接测量的量,现在都可以直接测量了。变间接测量为直接测量,有利于简化测量过程,是实验仪器设计开发的一条思路。

## 2. 单次测量与多次测量。

按测量次数的不同,可将测量分为单次测量和多次测量。

单次测量是指由于条件限制等原因,只对待测量测一次。例如,百米赛跑的时间测量,公路上的车速监控测量等。

多次测量是指对待测量进行多次重复的测量。从避免测量失误、提高测量准确程度来看,多次测量的好处是显而易见的。因此,在可能的条件下,应提倡对待测量进行多次测量。

多次测量要比单次测量花费较多的时间,有时还要花费较多的费用。因此,对待测量到底是采取单次测量还是采取多次测量,应在确保获得有效测量结果的前提下具体情况具体分析。

## 3. 等精度测量与非等精度测量。

按测量条件的不同,可将测量分为等精度测量与非等精度测量。

等精度测量是指在同等实验条件下对某一物理量进行的多次重复测量。例如,同一个实验者,用同一台仪器、采用同一种方法、在同样环境下对同一物理量进行的多次重复测量。由于没有任何依据来判断某次测量一定比另一次测量更精确,因此可认为这一系列的测量是等精度的。

非等精度测量是指在不同实验条件下对某一物理量进行的多次重复测量。例如,对某一物理量用不同仪器进行的测量,用不同方法进行的测量,在不同温度下进行的测量等。由于测量条件发生了改变,因而测量的结果可认为是不等精度的。

在物理实验中,凡是要求对某物理量进行多次重复测量的均指等精度测量。本课程中有关误差理论和实验数据的讨论,都是以等精度测量为前提的。



# 误差及其分类

## 一、真值与误差

任何一个物理量都有它的客观大小,这个客观存在的值称为该物理量的真值(true value)。测量的目的就是希望能够获得该真值。但由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的限制,任何测量值都不可能绝对精确地与真值完全一致,测量值与真值之间往往存在一定的偏差,这种偏差称为测量误差,简称误差(error)。

设某物理量的测量值为  $x$ , 相应的真值为  $x_0$ , 则测量误差  $\Delta x$  为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-1)$$

$\Delta x$  反映了测量值偏离真值的大小和方向,因此又称为绝对误差(absolute error)。由于  $x$  可能大于  $x_0$ , 也可能小于  $x_0$ , 因此绝对误差  $\Delta x$  可正可负。绝对误差是一个有量纲的量。

绝对误差与真值的大小之比称为相对误差(relative error), 记为

$$E(x) = \left| \frac{\Delta x}{x_0} \right| \times 100\% = \left| \frac{x - x_0}{x_0} \right| \times 100\% \quad (1-2)$$



相对误差是一个无量纲的量,通常又称为百分误差(percentile error).

由于物理量的真值虽然客观存在,但无法确切知道,因而误差也就无法精确求出.在一些具体问题中,可以用理论值、公认值或约定真值代替  $x_0$  来估算误差.后面我们将改用不确定度来评定测量结果.

## 二、误差的分类

根据误差产生的原因,可将误差分为系统误差与随机误差两大类.

### 1. 系统误差(systematic error).

系统误差是由于测量系统不完善而产生的误差.测量系统具有广义性,包括测量仪器、测量方法、测量环境和测量者等.系统误差的来源主要有以下几个方面:

#### (1) 仪器误差.

由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的误差.例如,仪器刻度不准、精度不够、安装调试不当等引起的误差.

#### (2) 理论误差.

由于实验所依据的理论公式的近似性或实验方法本身不完善所引起的误差.例如,用单摆测重力加速度实验中所用的公式  $g=4\pi^2 \frac{l}{T^2}$  本身就是近似公式;又如,在实验中忽略摩擦、散热、接触电阻等引起的误差.

#### (3) 环境误差.

由于测量环境不满足要求或环境不稳定而产生的误差.例如,测量过程中环境温度、湿度、气压变化引起的误差,如材料发生热胀冷缩等.

#### (4) 操作误差.

由于观测者个人感官和运动器官的反应不同或不良观测习惯所引起的误差.例如,观测方位不当,操作动作总是超前或滞后等引起的误差.

系统误差的特征是具有确定性,即在同一条件下对同一物理量进行多次测量时,系统误差的大小恒定,方向一致(测量值要么总是偏大,要么总是偏小);或当测量条件改变时,误差按某一确定的规律变化(如线性变化、周期性变化等).

在具体实验中,如能确切掌握系统误差的大小和变化规律,则可在测量过程中采取措施予以消除,或对测量结果进行系统误差的修正.例如,用游标卡尺或螺旋测微计测量工件尺寸时,若零点不对,应记下零点读数,对测量值进行零点修正,以消除系统误差.如果系统误差的大小和变化规律不能确切掌握,则一般难以做出修正,只能估计出它的极限范围.

### 2. 随机误差(random error).

随机误差是由实验中的各种随机因素产生的误差.引起随机误差的原因有很多.例如,电源电压的波动,空间电磁波的干扰,气流的变化,估计某次读数时可能偏大或偏小等.

随机误差的特点是具有随机性,即在同一条件下对同一物理量进行多次重复测量时,测量值的随机误差时大时小,时正时负,因而难以控制.对物理量进行多次测量可以减小随机误差,并可用统计方法估算出随机误差的大小.

假设系统误差已经修正,当测量次数足够多时,随机误差的分布具有明显的统计规律性.大多数情况下,随机误差服从正态分布(又称高斯分布),其函数表达式为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-3)$$

式中  $x-x_0$  为测量值  $x$  的随机误差;  $f(x)$  是  $x$  的概率密度函数;  $\sigma$  是该函数的一个参数, 称为正态分布的标准误差, 它是将各次测量的误差的平方取平均值后再开方, 故又称“方均根误差”, 即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}} \quad (n \rightarrow \infty \text{ 时}) \quad (1-4)$$

正态分布曲线如图 1-1 所示, 它是一条中间高两边低的钟形曲线. 图中横坐标  $x$  表示测量值, 纵坐标  $f(x)$  表示  $x$  的概率密度. 图中概率密度最大值对应的横坐标  $x_0$  就是测量量的真值; 横坐标上任一点  $x_i$  到  $x_0$  的距离  $\Delta x_i = x_i - x_0$  就是第  $i$  个测量值的随机误差;  $x_0 - \sigma$  和  $x_0 + \sigma$  为曲线拐点的横坐标.

图中曲线与  $x$  轴之间的面积表示测量值  $x$  在某一范围内的概率, 用  $P$  表示. 概率密度函数满足归一化条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (1-5)$$

上式代表图中曲线下方的总面积为 1, 即在  $(-\infty, +\infty)$  范围内,  $P=1$ . 给定区间不同, 则测量值出现的概率也不同. 这个给定的区间称为置信区间, 相应的概率称为置信概率.

由下列定积分计算, 可得测量值  $x$  落在置信区间  $(x_0 - \sigma, x_0 + \sigma)$  或误差落在  $(-\sigma, \sigma)$  内的概率为

$$\int_{x_0 - \sigma}^{x_0 + \sigma} f(x) dx = 0.683 = 68.3\% \quad (1-6)$$

同理, 可得误差落在  $(-2\sigma, 2\sigma)$  内的置信概率为 95.4%, 落在  $(-3\sigma, 3\sigma)$  内的置信概率为 99.7%. 由于测量值误差超过  $\pm 3\sigma$  范围的情况几乎不会出现, 所以把  $3\sigma$  称为极限误差.

由图 1-1 可见, 服从正态分布的随机误差具有以下特点:

(1) 单峰性.

正态分布曲线只在  $x=x_0$  处有一极大值, 形成曲线的单峰.  $x$  取临近  $x_0$  的值的概率大, 取远离  $x_0$  的值的概率小, 说明绝对值小的随机误差出现的概率大, 绝对值大的随机误差出现的概率小.

(2) 对称性.

曲线关于  $x_0$  对称, 在  $x_0$  的两侧, 绝对值相等的正负误差出现的概率相同.

(3) 有界性.

绝对值很大的随机误差出现的概率趋于零, 即误差的绝对值不超过一定的界限,  $3\sigma$  为极限误差.

(4) 抵偿性.

随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零, 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)}{n} = 0$$

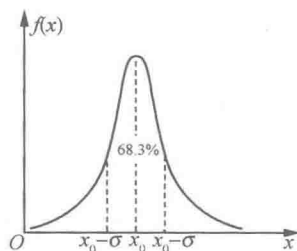


图 1-1 正态分布曲线





所以有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = x_0$$

上式表明,若排除系统误差,在测量次数  $n \rightarrow \infty$  时,各测量值的算术平均值即为真值.因此,增加测量次数可以减小随机误差,使算术平均值趋于真值.

实际上测量次数总是有限的.在等精度多次测量的情况下,如果测量次数  $n$  不太小,仍可用测量值的算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-7)$$

作为真值的最佳近似值.根据误差理论,算术平均值的标准偏差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-8)$$

可以证明, $x$  落在置信区间  $(\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma)$  内的概率为 68.3%.

由正态分布曲线和上述讨论可见, $\sigma$  大,则随机误差分布的离散程度大; $\sigma$  小,则随机误差分布的离散程度小.

以上讨论的误差不包括由于实验者在操作、计数、记录和运算等过程中出现失误而使测量值明显偏离真值所造成的过失误差(又称粗大误差).在实验过程中应尽量避免过失误差的出现,并按一定原则分析判断和剔除这类误差.



### 测量的精密度、正确度和精确度

对于实验测量结果的优劣,常用精密度、正确度和精确度来评价.

#### 一、精密度(precision of measurement)

精密度是指对同一物理量进行多次重复测量时,各测量值之间的彼此接近程度.精密度反映随机误差的大小:精密度越高,说明各测量值越接近,随机误差越小;反之,精密度越低,说明各测量值越离散,随机误差越大.

#### 二、正确度(correctness of measurement)

正确度是指测量值与真值的接近程度.正确度反映系统误差的大小:正确度越高,说明测量值越接近真值,系统误差越小;反之,正确度越低,说明测量值越偏离真值,系统误差越大.

#### 三、精确度(accuracy of measurement)

精确度是指测量结果的重复性与接近真值的综合好坏程度.精确度全面反映了随机误差和系统误差的大小程度,精确度高,说明精密度和正确度都高.精确度又称准确度.

精密度、正确度和精确度的意义及相互关系,可以用打靶时子弹着靶点的位置及分布来形象地理解,参见图 1-2,图中靶心代表被测量的真值,黑点代表各测量值.

通常所说的测量精度或计量器具的精度,一般即指精确度(准确度).