

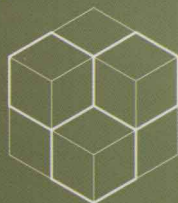


高等教育“十一五”规划教材

# 大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主 编 代 伟 方小兵



Experiment  
of College Physics



科学出版社

高等教育“十一五”规划教材

# 大学物理实验

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 代 伟 | 方小兵 | 主 编 |
| 陈中钧 | 徐平川 | 副主编 |
| 陈太红 | 曾体贤 |     |

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是根据教育部颁发的《高等理工科学学校物理实验课程教学基本要求》，结合作者多年物理实验教学实践经验编写而成的，具有“内容新、体系新”的特点。全书除编写了必要的大学物理实验外，还根据物理学的发展和教学的需要，编写了一些最重要、最基本的近代物理实验的内容。大多数实验都含有“必做内容”和“选做内容”。

本书充分反映了近几年大学物理实验教学改革成果及其发展趋势，注重实验内容的新颖性、综合性和应用性的结合，在精选基本实验的基础上，又充实了大量的具有强烈现代意识的智能化、数字化实验题目。另外，在传授知识的同时，注重培养学生的创新精神，因材施教，既保证了对教学要求的贯彻，又保证了个性的发展，为学生提供了一个良好的自主学习空间。

本书可作为理工科物理类和非物理类各专业大学物理实验课程的教材或参考书，也可供其他专业和社会读者阅读。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验/代伟，方小兵主编. —北京：科学出版社，2010.6  
(高等教育“十一五”规划教材)  
ISBN 978-7-03-027776-3

I. ①大… II. ①代… ②方… 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 (2010) 第 097509 号

策划：姜天鹏 宋 芳

责任编辑：王纯刚 李 瑜/ 责任校对：王万红

责任印制：吕春珉 / 封面设计：东方人华平面设计部

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>

北京路局票据印刷厂印刷

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

2011年6月第二次印刷 印张：21 1/2

印数：3 001-5 000 字数：492 000

定价：35.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈路局票据〉)

销售部电话 010-62140850 编辑部电话 010-62135517-2038

版权所有，侵权必究

举报电话：010-64030229；010-64034315；13501151303

## 本书编写人员名单

主 编 代 伟 方小兵

撰稿人 (按姓氏笔画排序)

方小兵 (安康学院)

代 伟 (西华师范大学)

陈中钧 (电子科技大学)

陈太红 (西华师范大学)

徐平川 (西华师范大学)

曾体贤 (西华师范大学)

# 前 言

《大学物理实验》是一门重要的基础实验课程，是师范类大学物理专业和普通高校理工科各专业必修基础课，其目的是通过物理实验，达到训练学生的科学实验方法和实验技能，培养学生的实践能力和创新精神。近半个世纪以来，随着现代科学技术不断发展，各学科相互交叉渗透，带动了物理实验内容和实验方法不断更新，进而提高了实验技术和实验水平。近几年来，不少高校加大了实验教学改革和实验室建设的力度，增加了许多智能化、数字化的新设备和新仪器。而教材作为教学内容的载体，是教学水平、教学质量的基本保证，也是课程体系和教学内容改革成果的核心体现。教学内容应反映当代教育思想和高科技成果，实验教学方法和内容应改变过去的单一验证性模式，高校培养的学生应“基础扎实、视野开阔、动手能力强、富有创新精神”。大学物理实验的任务是通过实验培养学生发现、分析和解决物理问题的能力，让学生系统地掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。因此，从 21 世纪科技发展和对人才科学素质要求的角度考虑，物理实验教学及其改革势在必行。

本书根据大学物理实验教学要求，从培养 21 世纪创新人才的目标出发，重视传授知识与能力、提高素质、增强创新意识等并重，加强实验技能训练，经过作者反复的实验教学实践，在修改实验讲义的基础上编写而成。为了使系统掌握物理实验的基本知识和基本方法，将不确定度及数据处理放在前面集中介绍。不确定度及数据处理是物理实验课的重要教学内容，也是学生实验中的难点，是耗费学生精力较多的地方，直接关系到后续实验的顺利进行。因此，本书用了较多的篇幅进行介绍，并且在不同的实验题目中对测量误差的估计和数据处理方法提出不同的要求，为学生进一步理解、掌握误差理论提供方便。

本书在编写的过程中，首先注意到了独立设置大学物理实验课程的必要性与教材体系的完整性。教材在传统的验证性实验、常规仪器使用训练的基础上，重新选择、组织和调整实验内容，增添综合性、设计性、具有延伸性的实验内容，通过“大学物理实验”这门课程的学习，使学生达到以下几个目标：①接受基本实验理论和操作技能的训练，熟练掌握基本物理量的测量原理和常用测量方法，能合理选择与正确使用基本仪器，能正确运用数值分析方法并掌握基本的实验数据处理方法，能对实验结果做出正确的分析和判断；②用实验的方法去观察、研究物理现象和规律，应用所学的理论知识指导实验，从理论和实验的结合上加深、扩展对物理基本概念和规律的认识，加强理论联系实际、提高指导学习物理的能力；③充分理解每个物理实验的构思、分析和解决问题的方法、仪器设计、实验步骤、测量技术，以及实验数据的处理和分析判断等思想。

本书主要内容包括测量误差及数据处理的基本知识以及力学、热学、电磁学、光学和近代物理实验中的基础实验及设计性实验。其次，遵循实验能力培养的规律性。本书对基本知识、基本仪器和基本方法等部分力求介绍的详细，并按不同层次由易到难，逐

步加强对知识的灵活应用,能力的综合训练。第三,注重实验教学的各个环节,每个实验都编写了思考题,促使学生认真准备、积极思考,加深理解实验目的、原理等内容。第四,注意了计算机在实验教学中的应用,对一些数据的处理、图线的拟合、线性回归等问题可以进行计算机处理。

参加本书编写工作的有:代伟(第三章和附录)、徐平川(第五章)、陈太红(第一章)、曾体贤(第六章),方小兵(第二章),陈中钧(第四章和第七章)。全书由代伟负责策划和统稿。

本书的编写是西华师范大学校级规划教材重点建设项目之一,受学校重点规划教材专项经费的资助,并得到了校、院领导和各界友好人士的热情鼓励和帮助,编写中参考了许多兄弟院校的相关教材,出版时科学出版社给予了大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于我们的水平有限,书中难免有缺点和错误,敬请读者批评指正。

编者

2010年1月16日

# 目 录

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 绪论 .....                 | 1   |
| 第一章 测量误差及数据处理 .....      | 5   |
| 第一节 测量与误差 .....          | 5   |
| 第二节 测量结果的评定和不确定度 .....   | 11  |
| 第三节 有效数字及其运算法则 .....     | 18  |
| 第四节 数据处理 .....           | 21  |
| 第二章 力学实验 .....           | 30  |
| 概述 .....                 | 30  |
| 实验一 长度测量 .....           | 40  |
| 实验二 固体和液体的密度测定 .....     | 41  |
| 实验三 重力加速度的测定(单摆法) .....  | 44  |
| 实验四 在气垫导轨上测量速度和加速度 ..... | 48  |
| 实验五 牛顿第二定律的验证 .....      | 52  |
| 实验六 谐振动的研究(用弹簧振子) .....  | 54  |
| 实验七 转动惯量和切变模量的测量 .....   | 56  |
| 实验八 扭摆法测定刚体转动惯量 .....    | 59  |
| 实验九 杨氏弹性模量的测量 .....      | 63  |
| 实验十 弦线振动的研究 .....        | 67  |
| 实验十一 声速的测定 .....         | 70  |
| 实验十二 复摆 .....            | 76  |
| 实验十三 多普勒效应综合实验 .....     | 79  |
| 第三章 热学实验 .....           | 83  |
| 实验一 金属比热的测定 .....        | 83  |
| 实验二 金属线胀系数的测定 .....      | 86  |
| 实验三 混合法测量液体比汽化热 .....    | 89  |
| 实验四 热功当量的测定(电热法) .....   | 93  |
| 实验五 气体三定律及气态方程的验证 .....  | 96  |
| 实验六 空气比热容比测定 .....       | 100 |
| 实验七 用混合法测量冰的溶解热 .....    | 103 |
| 实验八 不良导体导热系数的测定 .....    | 106 |



|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 实验九 液体表面张力系数的测定 .....        | 110        |
| 实验十 使用下落小球的方法测量液体的黏滞系数 ..... | 113        |
| 实验十一 半导体热敏电阻特性的研究 .....      | 116        |
| 实验十二 集成电路电阻温度特性测量及应用 .....   | 118        |
| <b>第四章 电磁学实验 .....</b>       | <b>120</b> |
| 电磁学实验基础知识 .....              | 120        |
| 实验一 伏安法测电阻 .....             | 132        |
| 实验二 电表的改装和校准 .....           | 135        |
| 实验三 学习使用万用电表 .....           | 139        |
| 实验四 静电场的模拟测绘 .....           | 144        |
| 实验五 惠斯通电桥 .....              | 148        |
| 实验六 用电位差计测量电池的电动势和内阻 .....   | 151        |
| 实验七 温差电偶的定标和测量 .....         | 154        |
| 实验八 电子束线实验 .....             | 158        |
| 实验九 霍尔效应及其应用 .....           | 165        |
| 实验十 螺线管轴向磁感应强度分布测量 .....     | 169        |
| 实验十一 磁化曲线与磁滞回线的研究 .....      | 175        |
| 实验十二 $RLC$ 电路的暂态过程 .....     | 181        |
| <b>第五章 光学实验 .....</b>        | <b>186</b> |
| 光学实验基础知识 .....               | 186        |
| 实验一 薄透镜焦距的测定 .....           | 199        |
| 实验二 用光学仪器测量放大率和微小长度 .....    | 203        |
| 实验三 分光仪的调整及棱镜折射率的测定 .....    | 209        |
| 实验四 透明介质折射率的测定 .....         | 213        |
| 实验五 用牛顿环测量平凸透镜曲率半径 .....     | 220        |
| 实验六 用透射光栅测光波波长及角色散率 .....    | 224        |
| 实验七 用菲涅耳双棱镜测波长 .....         | 227        |
| 实验八 测定单缝衍射的光强分布 .....        | 230        |
| 实验九 偏振光的研究 .....             | 235        |
| 实验十 迈克尔逊干涉仪的调整及使用 .....      | 238        |
| 实验十一 单色仪的定标 .....            | 244        |
| 实验十二 用小型棱镜摄谱仪测定光波波长 .....    | 248        |
| <b>第六章 近代和综合性物理实验 .....</b>  | <b>253</b> |
| 实验一 真空的获得与测量 .....           | 253        |
| 实验二 真空镀膜 .....               | 259        |



|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 实验三 密立根油滴实验 .....                     | 265        |
| 实验四 氢、氘原子光谱 .....                     | 271        |
| 实验五 夫兰克-赫兹实验 .....                    | 276        |
| 实验六 全息照相技术 .....                      | 279        |
| 实验七 塞曼效应 .....                        | 282        |
| 实验八 光电效应和普朗克常数测定 .....                | 288        |
| 实验九 核磁共振 .....                        | 292        |
| 实验十 光速的测定 .....                       | 296        |
| <b>第七章 设计性实验 .....</b>                | <b>301</b> |
| 实验一 简谐振动的研究 .....                     | 303        |
| 实验二 固体线胀系数的测定 .....                   | 304        |
| 实验三 电表的改装与校准 .....                    | 305        |
| 实验四 伏安法测非线性电阻 .....                   | 306        |
| 实验五 设计和组装欧姆表 .....                    | 307        |
| 实验六 设计和组装热敏电阻温度计 .....                | 308        |
| 实验七 设计热敏电阻温度开关 .....                  | 310        |
| 实验八 色散曲线的测定 .....                     | 311        |
| 实验九 组装望远镜和显微镜 .....                   | 312        |
| 实验十 单缝衍射 .....                        | 314        |
| 实验十一 电位差计校准电表和测定电阻 .....              | 315        |
| 实验十二 细丝直径测定 .....                     | 317        |
| 实验十三 用光电效应测薄膜的光吸收系数 .....             | 318        |
| 实验十四 用迈克尔逊干涉仪测钠双线的波长间隔 .....          | 319        |
| 实验十五 用迈克尔逊干涉仪测量白光光源的相干长度和玻璃薄片的折射率 ... | 320        |
| 实验十六 测定平行电流间的磁场力 .....                | 321        |
| 实验十七 用振动法测阻尼常数 .....                  | 322        |
| <b>附录 A 中华人民共和国法定计量单位 .....</b>       | <b>323</b> |
| <b>附录 B 常用物理数据 .....</b>              | <b>325</b> |
| <b>参考文献 .....</b>                     | <b>332</b> |

# 绪 论

## 一、物理实验的地位和作用

物理学研究的是自然物质的最基本最普遍的形式。物理学研究的运动,普遍存在于其他高级的、复杂的物质运动形式之中。因此,物理学所研究的物质运动规律,具有最大的普遍性。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。用人为的方法让自然现象再现,从而加以观察和研究,这就是实验。实验是人们认识自然和改造客观世界的基本手段。科学技术越进步,科学实验就显得越重要,任何一种新技术、新材料、新工艺、新产品都必须通过实验才能获得。由实验观察到的现象和测出的数据,加以总结和抽象,找出内在的联系和规律就得到理论,实验是理论的源泉。理论一旦提出,又必须借助实验来检验其是否具有普遍意义,实验是检验理论的手段,是检验理论的裁判。麦克斯韦提出的电磁理论(他预言电磁波存在)只有当赫兹做出电磁学实验后才被人们公认;杨振宁、李政道在1956年提出基本粒子在“弱相互作用下的宇称不守恒”的理论,只有当实验物理学家吴健雄用实验验证后,才被同行学者承认,从而才有可能获得诺贝尔奖。然而,人们掌握理论的目的是在于应用它来指导生产实际,促进科学进步,推动社会前进。当理论在实际中应用时,仍必须通过实验,实验是理论和应用的桥梁。任何一门学科的发展都离不开实验,这就使实验物理课有了充实的教学内容。物理实验是主要基础课程之一。

任何物理概念的确立、物理规律的发现,都必须以严格的科学实验为基础。物理实验的重要性,不仅表现在通过实验发现物理定律,而且物理学中的每一项重要突破都与实验密切相关。物理学史表明,经典物理学的形成,是伽利略、牛顿、麦克斯韦等人通过观察自然现象,反复实验,运用抽象思维的方法总结出来的。近代物理的发展是在某些实验的基础上提出假设,例如普朗克根据黑体辐射提出“能量子假设”,再经过大量的实验证实,假设才成为科学理论,实践证明物理实验是物理学发展的动力。在物理学发展的进程中,物理实验和物理理论始终是相互促进、相互制约、相得益彰的。没有理论指导的实验是盲目的,实验必须经过总结抽象上升为理论,才有其存在的价值,而理论靠实验来检验,同时理论上的需要又促进实验的发展。1752年富兰克林利用风筝把天空的电引入室内,进行室内雷鸣闪电实验,证实了雷电与电火花放电有同样的本质,进而找出了雷电的成因,并且在此基础上发明了避雷针。这个简单的实验事实足以说明,物理实验在物理学发展中所起的重要作用。

物理学发展到当今的时代,与实验的关系就更为密切,而且在许多边缘科学的建立过程中,物理实验也起到了重要的桥梁作用。物理实验在探索和研究新科技领域,在推动其他自然科学和工程技术的发展中,起到的重要作用是不可低估的。自然科学迅速发展,新的科学分支层出不穷,但基础学科就是数学和物理两门,物理实验是研

究物理测量方法与实验方法的科学,物理实验的特点在于它具有普遍性——力、热、光、电都有;具有基本性——它是其他一切实验的基础;同时它还有通用性——适用于一切领域,把高、精、尖的复杂实验分解成为“零件”,绝大部分是常见的物理实验。在工程技术领域中,研制、生产、加工、运输等都普遍涉及物理量的测量及物理运动状态的控制,这正是成熟的物理实验的推广和应用。现代高科技发展,设计思想、方法和技术也来源于物理实验。因此,物理实验是自然科学、工程技术和高科技发展的基础,科学技术的发展离不开物理实验。

## 二、物理实验课的目的和任务

### 1. 大学物理实验课的目的

1) 通过对物理实验现象的观测和分析,学会运用理论指导实验、分析和解决实验中的问题和方法。从理论和实际的结合上加深对理论的理解。

2) 培养学生从事科学实验的初步能力。通过实验阅读教材和资料,能概括出实验原理和方法的要点;正确使用基本实验仪器,掌握基本物理量的测量方法和实验操作技能;正确记录和处理数据,分析实验结果和撰写实验报告;自行设计和完成不太复杂的实验任务等。

3) 培养学生实事求是的科学态度、严谨的工作作风,勇于探索、坚韧不拔的钻研精神,以及遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品德。

### 2. 大学物理实验课的具体任务

1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验的基本知识、基本方法和基本技能,加深对物理概念和规律的认识、对物理学原理的理解,为后续课程打下基础。

2) 培养和提高学生的科学实验素养,要求学生具有:

① 理论联系实际和解决实际问题的能力;

② 勤奋学习,认真实验的良好学风;

③ 主动研究和积极探索的创新精神;

④ 遵守实验室守则,注意仪器操作要领,培养爱护仪器的优良品德。

3) 培养学生组织有关中学物理教学、指导中学物理实验的基本能力。物理实验课的进行程序大致可分为:提出问题,确定方案,选择仪器设备,安装调试,观察测量,记录数据,总结分析写出科学论文(实验报告)。每个实验环节都有一定的基本要求和基本技能训练,科学实验基本技能的训练贯穿于实验的全过程中,实验方法各自分散在不同的实验中。因此,实验课有它自身的体系,要达到学会实验、掌握基本技能的目的,就要认真进行每个实验环节的训练,并且在不同实验中学习实验方法。

4) 培养学生做好实验的能力。

① 实验前要做好预习。预习时,主要是阅读实验教材,了解实验目的,搞清楚实验内容,要测量什么量,使用什么方法,实验的理论依据(原理)是什么,使用什么仪器,其仪器性能是什么,如何使用,操作要点及注意事项等,在此基础上,回答好思考题,草拟出操作步骤,设计好数据记录表格,准备好自备的物品。

只有在充分了解实验内容的基础上,才能在实验操作中有目的地观察实验现象,思考问题,减少操作中的忙乱现象,提高学习的主动性。因此,每次实验前,学生必须完成规定的预习内容,一般情况下,教师要检查学生预习情况,并评定预习成绩,没有预习的学生不许做实验。

② 课堂认真进行实验。实验课一般先由指导教师作重点讲解,交代有关注意事项,扼要、简单地讲授内容,具有指导性和启发性,学生要结合自己的预习逐一领会,特别要注意那些在操作中容易失误的地方。

在实验进程中,首先是布置、安装和调试仪器。桌面上若干个仪器是否布置合理,读数是否方便,做到操作有序、勤动脑子,使仪器设备尽量能为我所用。为了使仪器装置达到最佳工作状态,必须细致、耐心地进行调试。这样很可能要花较多时间,切忌急躁。要合理选择仪器的量程,如果在调试中遇到了困难而自己不能解决时,可以请教师指导。

调试准备就绪后,开始进行测量。实验时一定要先观察实验现象,通过观察对被验证的定律或被测的物理量有个定性的了解,而后再进行精确的测量。测量的原始数据要整齐地记录在自己设计的表格中,读数一定要认真仔细,实验原始数据的优劣,决定着实验的成败。记录的数据一定要标明单位。不要忘记记录有关的环境条件,如温度、压强等。如果两个学生同时做一个实验,既要分工又要协作,各自记录实验数据,共同完成实验任务。

在测量过程中要尽量保持实验条件不变,要注意操作姿势,身体不要倚靠桌子,不要使仪器发生移动或受到振动。如果遇到仪器装置出现故障,学生应力求自己动手解决,或留意观看教师是怎样分析判断仪器的毛病、怎样修复仪器的(可能当场修复的仪器)。测量完数据后,记录的数据要经指导教师审阅签字,然后再进行数据处理。如果发现错误数据,要重新进行测量。

③ 写实验报告。实验报告是对实验工作的总结,是交流实验经验、推广实验成果的媒介。学会编写实验报告是培养实验能力的一个方面。写实验报告要用简明的形式将实验结果完整、准确地表达出来,要求文字通顺、字迹端正、图表规范、结果正确、讨论认真。实验报告要求在课后独立完成,用学校统一印制的“实验报告纸”来书写。

实验报告通常包括以下内容。

**实验名称** 说明做什么实验。

**实验目的** 说明为什么做这个实验,做该实验要达到什么目的。

**实验仪器** 列出主要仪器的名称、型号、规格、精度等。

**实验原理** 阐明实验的理论依据,写出待测量计算公式的简要推导过程,画出有关的图(原理图或装置图),如电路图、光路图等。

**数据记录** 实验中所测得的原始数据要尽可能用表格的形式列出,正确表示有效数字和单位。

**数据处理** 根据实验目的对实验结果进行计算或作图,并对测量结果进行评定,计算不确定度,计算要写出主要的计算内容。

**实验结果** 扼要写出实验结论,要体现出测量数据、误差和单位。

**问题讨论** 讨论实验中观察到的异常现象及其可能的解释,分析实验误差的主要来源,对实验仪器的选择和实验方法的改进提出建议,简述自己做实验的心得体会,回答实验思考题。

为了保证实验课程的正常进行,现在对实验报告提出以下 3 点要求。

1) 课前预习实验内容,明确实验目的,了解实验原理,弄清实验步骤,初步了解仪器的使用方法,画好实验数据记录表格。未做好预习者不得动手做实验。

2) 在测量时,应如实、即时做好实验数据记录(数据记录要整洁,字迹清楚,避免错记),不可事后凭回忆“追记”数据,更不可为拼凑数据而将实验数据记录随意涂改。

3) 实验报告要认真、按时完成。

# 第一章 测量误差及数据处理

物理实验的任务不仅是定性地观察各种自然现象，更重要的是定量地测量相关物理量。而对事物定量地描述又离不开数学方法和进行实验数据的处理。因此，误差分析和数据处理是物理实验课的基础。本章将从测量及误差的定义开始，逐步介绍有关误差和实验数据处理的方法和基本知识。误差理论及数据处理是一切实验结果中不可缺少的内容，是不可分割的两部分。误差理论是一门独立的学科。随着科学技术事业的发展，近年来误差理论的基本概念和处理方法也有很大发展。误差理论以数理统计和概率论为其数学基础，研究误差性质、规律及如何消除误差。实验中的误差分析，其目的是对实验结果做出评定，最大限度地减小实验误差，或指出减小实验误差的方向，提高测量质量，提高测量结果的可信赖程度。对低年级大学生，这部分内容难度较大，本课程仅限于介绍误差分析的初步知识，着重介绍几个重要概念及最简单情况下的误差处理方法，不进行严密的数学论证，减小学生学习的难度，有利于学好物理实验这门基础课程。

## 第一节 测量与误差

物理实验不仅要定性地观察物理现象，更重要的是找出有关物理量之间的定量关系。因此就需要进行定量测量，以取得物理量数据的表征。对物理量进行测量，是物理实验中极其重要的一个组成部分。对某些物理量的大小进行测定，实际上就是将此物理量与规定的作为标准单位的同类量或可借以导出的异类物理量进行比较，得出结论，这个比较的过程就叫做测量。例如，物体的质量可通过与规定用千克作为标准单位的标准砝码进行比较而得出测量结果；物体运动速度的测定则必须通过与两个不同的物理量，即长度和时间的标准单位进行比较而获得。比较的结果记录下来就叫做实验数据。测量得到的实验数据应包含测量值的大小和单位，二者是缺一不可的。

国际上规定了7个物理量的单位为基本单位，其他物理量的单位则是由基本单位按一定的计算关系式导出的。因此，除基本单位之外的单位均称为导出单位，如速度、力、电压、电阻等物理量的单位都是导出单位。

一个被测物理量，除了用数值和单位来表征它外，还有一个很重要的表征它的参数，这便是对测量结果可靠性的定量估计。这个重要参数往往容易为人们所忽视。设想如果得到一个测量结果的可靠性几乎为零，那么这种测量结果还有什么价值呢？因此，从表征被测量这个意义上来说，对测量结果可靠性的定量估计与其数值和单位至少具有同等的重要意义，三者是缺一不可的。

测量可以分为两类。按照测量结果获得的方法来分，可将测量分为直接测量和间接测量两类；而从测量条件是否相同来分，又分为等精度测量和不等精度测量。

根据测量方法可分为直接测量和间接测量。直接测量就是把待测量与标准量直接比较得出结果,如用米尺测量物体的长度,用天平称量物体的质量,用电流表测量电流等,都是直接测量。间接测量是借助函数关系由直接测量的结果计算出所谓的物理量,如已知路程和时间,根据速度、时间和路程之间的关系求出的速度就是间接测量。

一个物理量能否直接测量不是绝对的。随着科学技术的发展和测量仪器的改进,很多原来只能间接测量的量,现在可以直接测量了,如电能的测量本来是间接测量,现在也可以用电度表来进行直接测量。物理量的测量,大多数是间接测量,但直接测量是一切测量的基础。

根据测量条件来分,有等精度测量和非等精度测量。等精度测量是指在同一(相同)条件下进行的多次测量,如同一个人,用同一台仪器,每次测量时周围环境条件相同,等精度测量每次测量的可靠程度相同。反之,若每次测量时的条件不同,或测量仪器改变,或测量方法、测量条件改变,这样所进行的一系列测量叫做非等精度测量,非等精度测量的结果,其可靠程度自然也不相同。物理实验中大多采用等精度测量。应该指出:重复测量必须是重复进行测量的整个操作过程,而不是仅仅为重复读数。

测量仪器是进行测量的必要工具。熟悉仪器性能,掌握仪器的使用方法及进行正确读数,是每个测量者必备的基础知识。下面简单介绍仪器精密度、准确度和量程等基本概念。

1) 仪器精密度是指仪器的最小分度相当的物理量。仪器最小的分度越小,所测量物理量的位数就越多,仪器精密度就越高。对测量读数最小一位的取值,一般来讲应在仪器最小分度范围内再进行估计读出一位数字。例如,具有毫米分度的米尺,其精密度为1mm,应该估计读出到毫米的十分位;螺旋测微器的精密度为0.01mm,应该估计读出到毫米的千分位。

2) 仪器准确度是指仪器测量读数的可靠程度,它一般标在仪器上或写在仪器说明书上,如电表仪表所标示的级别就是该仪器的准确度。对于没有标明准确度的仪器,可粗略地取仪器最小的分度数值或最小分度数值的一半,一般对连续读数的仪器取最小分度数值的一半,对非连续读数的仪器取最小的分度数值。在制造仪器时,其最小的分度数值是受仪器准确度约束的,对不同的仪器准确度是不一样的,对测量长度的常用仪器米尺、游标卡尺和螺旋测微器它们的仪器准确度依次提高。

3) 量程是指仪器所能测量的物理量最大值和最小值之差,即仪器的测量范围(有时也将所能测量的最大值称为量程)。测量过程中,超过仪器量程使用仪器是不允许的,轻则仪器准确度降低,使用寿命缩短,重则损坏仪器。

### 一、误差与偏差

测量的目的就是为了得到被测物理量所具有的客观真实数据,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,只能获得该物理量的近似值,也就是说,一个被测量值 $N$ 与真值 $N_0$ 之间总是存在着这种差值,这种差值称为测量误差,即

$$\Delta N = N - N_0$$



显然误差  $\Delta N$  有正负之分,因为它是指与真值的差值,常称为绝对误差。注意,绝对误差不是误差的绝对值。

误差存在于一切测量之中,测量与误差形影不离,分析测量过程中产生的误差,将影响降低到最低程度,并对测量结果中未能消除的误差做出估计,是实验中的一项重要工作,也是实验的基本技能。实验总是根据对测量结果误差限度的一定要求来制定方案和选用仪器的,不要以为仪器精度越高越好。因为测量的误差是各个因素所引起的误差的总和,要以最小的代价来取得最好的结果,要合理地设计实验方案,选择仪器,确定采用这种或那种测量方法。如比较法、替代法、天平复称法等,都是为了减小测量误差;对测量公式进行这样或那样的修正,也是为了减少某些误差的影响;在调节仪器时,如调仪器使其处于铅直、水平状态,要考虑到什么程度才能使它的偏离对实验结果造成的影响可以忽略不计;电表接入电路和选择量程都要考虑到引起误差的大小。在测量过程中某些对结果影响大的关键量,就要努力想办法将它测准;有的测量不太准确对结果没有什么影响,就不必花太多的时间和精力,在进行处理数据时,某个数据取到多少位,怎样使用近似公式,作图时坐标比例、尺寸大小怎样选取,如何求直线的斜率等,都要考虑到引入误差的大小。

由于客观条件所限、人们认识的局限性,测量不可能获得待测量的真值,只能是近似值。设某个物理量真值为  $x_0$ , 进行  $n$  次等精度测量,测量值分别为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , (测量过程无明显的系统误差), 它们的误差为

$$\Delta x_1 = x_1 - x_0$$

$$\Delta x_2 = x_2 - x_0$$

...

$$\Delta x_n = x_n - x_0$$

求和

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = \sum_{i=1}^n x_i - nx_0$$

即

$$\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - x_0$$

当测量次数  $n \rightarrow \infty$ , 可以证明  $\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n} \rightarrow 0$ , 而且  $\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{x}$  是  $x_0$  的最佳估计值, 称  $\bar{x}$  为测量值的近似真实值。为了估计误差, 定义测量值与近似真实值的差值为偏差, 即  $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ , 偏差又叫做“残差”。实验中难以测得真值, 因此误差也无法知道, 而测量的偏差可以准确知道, 实验误差分析中要经常计算这种偏差, 用偏差来描述测量结果的精确程度。

## 二、相对误差

绝对误差与真值之比的百分数叫做相对误差, 用  $E$  表示, 即

$$E = \frac{\Delta N}{N_0} \times 100\%$$

由于真值无法知道, 所以计算相对误差时常常用  $N$  代替  $N_0$ 。在这种情况下,  $N$  可能是公认值, 或高一级精密仪器的测量值, 或测量值的平均值。相对误差用来表示测量的相对精确度, 相对误差用百分数表示, 保留两位有效数字。

### 三、系统误差与随机误差

根据误差的性质和产生的原因, 可分为系统误差和随机误差。

#### 1. 系统误差

系统误差是指在一定条件下多次测量的结果总是向一个方向偏离, 其数值一定或按一定规律变化。系统误差的特征是具有一定的规律性。系统误差的来源具有以下几个方面。

- 1) 仪器误差。它是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。
- 2) 理论误差。它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, 或测量方法等所带来的误差。
- 3) 观测误差。它是由于观测者本人生理或心理特点造成的误差。例如, 用“落球法”测量重力加速度, 由于空气阻力的影响, 多次测量的结果总是偏小, 这是测量方法不完善造成的误差; 用停表测量运动物体通过某一段路程所需要的时间, 若停表走时太快, 即使测量多次, 测量的时间  $t$  总是偏大为一个固定的数值, 这是仪器不准确造成的误差; 在测量过程中, 若环境温度升高或降低, 使测量值按一定规律变化, 这是由于环境因素变化引起的误差。

在任何一项实验工作和具体测量中, 必须要想尽一切办法, 最大限度地消除或减小一切可能存在的系统误差, 或者对测量结果进行修正。发现系统误差需要改变实验条件和实验方法, 反复进行对比, 系统误差的消除或减小是比较复杂的一个问题, 没有固定不变的方法, 要具体问题具体分析各个击破。产生系统误差的原因可能不止一个, 一般应找出影响的主要因素, 有针对性地消除或减小系统误差。以下介绍几种常用的方法。

1) 检定修正法: 指将仪器、量具送计量部门检验取得修正值, 以便对某一物理量测量后进行修正的一种方法。

2) 替代法: 指测量装置测定待测量后, 在测量条件不变的情况下, 用一个已知标准量替换被测量来减小系统误差的一种方法。例如, 消除天平的两臂不等对待测量的影响可用此办法。

3) 异号法: 指对实验时在两次测量中出现符号相反的误差, 采取平均值后消除的一种方法。例如, 在外界磁场作用下, 仪表读数会产生一个附加误差, 若将仪表转动  $180^\circ$  再进行一次测量, 外磁场将对读数产生相反的影响, 引起负的附加误差。两次测量结果平均, 正负误差可以抵消, 从中可以减小系统误差。

#### 2. 随机误差

在实际测量条件下, 多次测量同一量时, 误差的绝对值符号的变化时大时小、时