



"十二五"普通高等教育本科国家级规划教材

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

# 大学物理实验

(第三版)

◎主 编 李学慧 徐朋 部德才

高等教育出版社



"十二五"普通高等教育本科国家级规划教材

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

# 大学物理实验

Daxue Wuli Shiyān

(第三版)

◎主 编 李学慧 徐朋 部德才

内容提要

本书第一版是普通高等教育“十五”国家级规划教材,第二版是在实验课程教学改革经验的基础上,根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)修订而成的,第三版是入选“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材后,根据学科的发展进行了新的修订与完善。全书分五章。第一章“绪论”介绍了物理实验课程的教学培养目标、教学安排及物理测量中应注意的原则和事项,还介绍了基本物理实验方法的分类及在物理测量中的应用。第二章介绍了测量不确定度的评定与表达方法。第三章、第四章、第五章分别编入了基础性实验、提高性实验和研究性实验题目共67项,其中第五章还阐述了“课程论文的写作要求”。

本书具有如下特点:一是贴近课堂教学,为学生的学习服务,与物理实验课程的教学体系相配套;二是努力做到传授知识与培养能力相融合、科学教育与人文教育相融合;三是为了促进教学与科研相结合,尝试将教师的科研成果引入实验教学。

本书可作为普通高等学校理、工、农、医、药各专业的物理实验教材,也可作为相关专业技术人员和和其他有关人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/李学慧,徐朋,部德才主编.--3

版.--北京:高等教育出版社,2016.7

ISBN 978-7-04-045186-3

I. ①大… II. ①李… ②徐… ③部… 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(2016)第 080482 号

|      |     |      |     |      |     |      |     |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| 策划编辑 | 马天魁 | 责任编辑 | 马天魁 | 封面设计 | 张申申 | 版式设计 | 童 丹 |
| 插图绘制 | 邓 超 | 责任校对 | 刘春萍 | 责任印制 | 毛斯璐 |      |     |

|      |                     |      |                                                                   |
|------|---------------------|------|-------------------------------------------------------------------|
| 出版发行 | 高等教育出版社             | 网 址  | <a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>         |
| 社 址  | 北京市西城区德外大街 4 号      |      | <a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>         |
| 邮政编码 | 100120              | 网上订购 | <a href="http://www.hepmall.com.cn">http://www.hepmall.com.cn</a> |
| 印 刷  | 国防工业出版社印刷厂          |      | <a href="http://www.hepmall.com">http://www.hepmall.com</a>       |
| 开 本  | 787mm × 1092mm 1/16 |      | <a href="http://www.hepmall.cn">http://www.hepmall.cn</a>         |
| 印 张  | 26.5                | 版 次  | 2005 年 6 月第 1 版                                                   |
| 字 数  | 580 千字              |      | 2016 年 7 月第 3 版                                                   |
| 购书热线 | 010-58581118        | 印 次  | 2016 年 7 月第 1 次印刷                                                 |
| 咨询电话 | 400-810-0598        | 定 价  | 46.00 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 45186-00

# 序

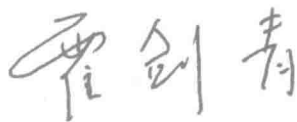
物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的学科。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,是自然科学和工程技术的基础。在人类追求真理、探求未来世界的过程中,物理学展现的一系列科学的世界观和方法论,深刻影响着人类对物质世界的基本认识,是人类文明的基石。

物理学本质上是一门实验科学。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,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。物理实验课凝练了数百年来物理学在改变世界的发展中所展现的创新思维方法、精湛的实验技能、丰厚的科技成果和人文精神。物理实验课是高等学校理工科类院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,也是高校文科类学生学习科学文化和人文文化的基础课程。它在培养学生创新思维、探究精神、实践能力和创新能力等方面发挥着无可替代的重要作用。

教材是教学的依据,它反映了教学思想、教学目标、教学内容和教学模式,是理念和教学成果的结晶,是教学质量的重要保障。大连大学李学慧教授主编的《大学物理实验》教材凝练了她和她带领的团队长期以来以坚韧不拔的精神、坚持不懈地探究,在科学研究、教学研究实践中形成的先进教学理念、教学方法和教学成果。该教材体系新颖、结构合理、内容丰富、适用性强,是一套特色鲜明的能广泛适应于高等学校各专业学生的教材。

该教材根据各专业、各层次学生的特点,将大学物理实验分为基础性、提高性、研究性实验三个层次,各层次实验都涵盖了力学、热学、电磁学、光学和近代物理领域的教学内容。实验内容涉及的知识面广,适当地引入了科研成果和涉及边缘学科、前沿学科和交叉学科的特色实验,充分体现了现代科学技术成就具有多种学科交叉和互相渗透的特点,又很好地增强了学生知识面的深度和广度,激发了学生的学习热情。教材所选择的实验题目贴近生活和生产实际,包含分层次的设计性的内容、创新性的题目及相关的参考资料。教材结合“学生工作室”“创新基金”“创业大赛”等形式的教学活动,带动了学生参加与教学相结合的科研课题,形成了教学、科研相互促进的良性互动机制,卓有成效地激发了各层次学生主动学习的热情,培养了他们的创新思维、实践能力和创新能力。

我可喜地看到该教材自2005年出版后,在大连大学物理实验教学 and 全国高校物理实验教学中产生了重要影响,发挥了很好的作用。本版教材进一步融进了近几年大连大学物理实验教学在国家级实验教学示范中心建设、精品课程建设和教学实践中的新理念、新经验、新成果。祝愿本教材的再版在进一步提高高校物理实验教学水平和教学质量的工作中发挥重要和广泛的作用。



2012.3.16

# 前言

普通物理实验是学生进入大学后第一门科学实验的课程。本课程应该让学生受到比较严格和系统的基本实验技能的训练,以培养学生的实践能力和创新能力,并在实验教学过程中使学生逐步养成严谨的治学态度和求实的科学作风,为他们今后的成长打下良好的基础。

本书是在总结参编院校物理实验课程教学改革经验的基础上,根据教育部物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求(2010年版)》编写而成。在编写过程中还认真汲取了国内兄弟院校教学改革优秀成果,力图为学生奉献一本他们喜爱的教材。

本教材的写作宗旨有三条,第一条是,要使教材尽量贴近课堂教学,为学生的学习服务,与物理实验课程的教学体系相配套。

我们在教学改革的实践中,提出了“三段式”的课程教学体系,就是把整个实验教学过程分成基础性实验、提高性实验、研究性实验三个阶段。这个课程体系最显著的特点是,低起点、高台阶,既能适应低年级学生的接受能力,又能达到较高的教学培养目标。

基础性实验共编入12个实验题目,这一教学阶段应使学生了解基本物理实验方法的分类和应用,并着重进行物理实验数据处理方法的训练。在每一个实验题目内,都附有该实验的数据处理示例,以供学生参考。这样做的目的是为了降低学生学习误差理论的难度。

提高性实验共编入42个实验题目,这一教学阶段着重培养学生的自学能力和分析解决问题的能力。在大部分实验题目中,都列出了课堂讨论题,这些讨论题往往是该实验的教学基本点,它既可以帮助学生抓住重点,又能为教师提供一些课堂设计的思路。

研究性实验共编入13个实验题目,学生可以根据自己的兴趣和爱好选择一个题目作为研究性课题,独立地完成方案设计、操作测量、撰写课程论文、公开答辩等全部教学过程。这种研究式的学习方法,可以充分发挥学生的主动性和创造性。在研究性实验的预备知识中还编入了“课程论文的写作要求”一节,不仅可以帮助学生按国家有关规范来撰写课程论文,而且对于学生今后撰写学位论文及报刊学术论文都会有所帮助。

第二章“物理实验数据的处理方法”是根据国家计量技术规范JJF 1059—2012《测量不确定度评定与表示》的基本精神编写而成的。作者根据教学的需要和学生的接受能力,对上述文献作了必要的简化,力争做到科学性、简捷性和通用性的完美结合。所谓科学性,是指不确定度的评定方法和程序、测量结果的表达方式以及基本术语的阐述都与国家相关的法规和规范保持一致;所谓简捷性,是指只需四个学时就可以完成本章内容的讲授;所谓通用性,是指书中给出的数据处理方法,既能在学生

的后续课程中适用,也能在学生未来的技术岗位上适用。本章内容在编写过程中,得到了我国计量学界著名学者、“JJF1059—1999”的第一起草人李慎安先生的热情帮助与指导,李先生在百忙中逐字逐句地审阅了本章的全部书稿,并在多处作了精彩的修改,相信这部分内容会受到学生的喜爱。

本教材写作宗旨的第二条是,尽最大努力使本教材做到传授知识与培养能力相融合、科学教育与人文教育相融合。在大部分实验题目中,除包括“基本实验”的内容外,还开设了“阅读材料”和“创新园地”两个小版块,我们的初衷是,把“基本实验”作为本书的知识结构,把“创新园地”和“阅读材料”分别作为本书的能力结构和人文结构。在教材中阐述基本实验内容时,如遇到物理学史上的重要人物和重大事件,则采用“页末注”的形式向学生作简要介绍,目的是使学生对于相关物理实验的背景有更进一步的了解,以激发学生的学习兴趣。

本教材写作宗旨的第三条是,努力尝试将教学与科研相结合。如实验五十九、实验六十、实验六十三等题目,是作者将自己的科研成果加以提炼和浓缩后,精心地移植到实验教学中。这些科研成果都已获得了国家专利,有的已经投入小批量生产;又如实验五十五、实验五十六、实验五十七、实验五十八等题目,是将大学生科技创新活动中的优秀作品,经严格筛选后移植到实验教学中的。这样做的目的是,使教学与科研相互促进,为学生营造一个“研究式学习”的氛围,并为学生早期接触和参加科研活动提供一些机会。

本书编写的分工如下:

李学慧编写第一章及实验一、十、十三、十九、二十三、五十三、五十四、五十五、五十六、五十八、五十九;徐朋对第三版第二章及第五章中“课程论文的写作要求”一节进行修订与完善并编写实验三、七、十四、十五、十八、二十九、三十四、三十六、五十一;部德才编写实验十六、二十一、二十二、二十七、二十八、四十七、四十八、四十九、六十二、六十三;霍飒编写实验六、十七、二十四、二十六、三十二、三十七、六十六;张宏剑编写实验九、二十、三十、三十一、三十五、三十九、四十、六十五;刘军编写实验八、三十八、四十一、四十二、四十六、五十二、六十、六十四;李艳琴编写实验四、五、十一、二十五、四十三、四十五、六十七;董桂馥编写实验二、十二、三十三、四十四、五十、五十七、六十一。唐福深编写第一版第二章及第五章中“课程论文的写作要求”一节。

大连理工大学唐福深教授对第一版教材的创作思想提出许多指导性意见,并认真地审阅全部书稿,提出许多重要的修改意见。

本书第三版是在入选“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材后进行的修订与完善,在此过程中,自始至终得到了高等教育出版社马天魁同志的支持和帮助,也得到了参编作者所在院校的领导和同事们的支持和帮助。在本书即将出版的时候,编委会全体成员真诚地向他们表示最崇高的敬意。

由于编者水平有限,书中难免有缺点和错误,敬请批评指正。

编者

2015年3月于大连

# 目录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第一章 绪论 .....                 | 1   |
| 一、物理实验课程的地位和作用 .....         | 1   |
| 二、物理实验课程的教学目标 .....          | 1   |
| 三、物理实验课程的教学安排 .....          | 2   |
| 四、物理实验课的注意事项 .....           | 2   |
| 五、基本物理实验方法简述 .....           | 5   |
| 第二章 物理实验数据的处理方法 .....        | 10  |
| 一、学习物理实验数据处理方法的意义 .....      | 10  |
| 二、测量的基本术语及其解释 .....          | 10  |
| 三、直接测量的数据处理 .....            | 13  |
| 四、间接测量的数据处理 .....            | 17  |
| 五、双变量测量的数据处理 .....           | 21  |
| 六、有效数字及其运算 .....             | 26  |
| 附录 1 实验室常用仪器的最大允许误差 .....    | 27  |
| 附录 2 袖珍计算器的使用 .....          | 30  |
| 第三章 基础性实验 .....              | 35  |
| 实验一 长度的测量 .....              | 35  |
| 实验二 密度的测量 .....              | 41  |
| 实验三 惠斯通电桥测电阻 .....           | 49  |
| 实验四 转动惯量的测量 .....            | 56  |
| 实验五 电子示波器的使用 .....           | 65  |
| 实验六 透镜焦距的测量 .....            | 76  |
| 实验七 用模拟法测绘静电场 .....          | 82  |
| 实验八 牛顿环实验 .....              | 87  |
| 实验九 用分光计测光学玻璃折射率 .....       | 92  |
| 实验十 用单摆测重力加速度 .....          | 99  |
| 实验十一 液体表面张力系数的测量 .....       | 103 |
| 实验十二 液体黏度的测量 .....           | 109 |
| 实验十三 亥姆霍兹线圈的磁场测量 .....       | 115 |
| 实验十四 牛顿第二定律的研究 .....         | 119 |
| 实验十五 简谐振动的研究 .....           | 126 |
| 实验十六 用板式电势差计测电池的电动势和内阻 ..... | 131 |
| 实验十七 拉伸法测金属杨氏模量 .....        | 137 |
| 实验十八 直流电表的改装 .....           | 144 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 实验十九 铜电阻和热敏电阻的温度特性 .....       | 149 |
| 实验二十 用分光计测光栅参量 .....           | 152 |
| 第四章 提高性实验 .....                | 161 |
| 实验二十一 冷却法测量固体的比热容 .....        | 161 |
| 实验二十二 电势差计的使用 .....            | 165 |
| 实验二十三 动力学共振法测金属杨氏模量 .....      | 169 |
| 实验二十四 热电偶的定标与测温 .....          | 177 |
| 实验二十五 电子束磁聚焦及电子比荷的测量 .....     | 181 |
| 实验二十六 动态磁滞回线的测量 .....          | 187 |
| 实验二十七 $RLC$ 串联电路暂态过程的研究 .....  | 193 |
| 实验二十八 $RLC$ 串联电路稳态特性的研究 .....  | 199 |
| 实验二十九 声速的测量 .....              | 205 |
| 实验三十 霍耳效应实验 .....              | 209 |
| 实验三十一 偏振光的研究 .....             | 214 |
| 实验三十二 迈克耳孙干涉仪的调节和使用 .....      | 219 |
| 实验三十三 单缝衍射 .....               | 225 |
| 实验三十四 用复摆测重力加速度 .....          | 230 |
| 实验三十五 冲击法测量磁场 .....            | 237 |
| 实验三十六 铁磁材料居里点的测量 .....         | 243 |
| 实验三十七 电介质介电常量的测量 .....         | 247 |
| 实验三十八 用电测法测定水的汽化热 .....        | 253 |
| 实验三十九 螺线管轴向磁场分布的测量 .....       | 256 |
| 实验四十 伏安法测电阻及电表的选择 .....        | 261 |
| 实验四十一 用光电效应测普朗克常量 .....        | 266 |
| 实验四十二 交流电桥 .....               | 271 |
| 实验四十三 球球碰撞的实验研究 .....          | 277 |
| 实验四十四 密立根油滴法测电子电荷 .....        | 283 |
| 实验四十五 固体导热系数的测量 .....          | 289 |
| 实验四十六 直流控制电路输出特性的研究 .....      | 296 |
| 实验四十七 压力传感器特性及人体心律与血压的测量 ..... | 303 |
| 实验四十八 人耳听觉听阈的测量 .....          | 308 |
| 实验四十九 A 类超声波应用研究 .....         | 315 |
| 实验五十 人体反应时间的测量 .....           | 320 |
| 第五章 研究性实验 .....                | 324 |
| 一、研究性实验阶段的教学安排 .....           | 324 |
| 二、物理实验课程论文的写作要求 .....          | 326 |
| 实验五十一 万用表电路的设计与组装 .....        | 330 |
| 实验五十二 黑箱实验 .....               | 338 |

|       |                            |     |
|-------|----------------------------|-----|
| 实验五十三 | 电饭锅温度控制电路的设计与组装 .....      | 341 |
| 实验五十四 | 热敏电阻温度计的设计安装和使用 .....      | 344 |
| 实验五十五 | 磁性液体表观密度的实验研究 .....        | 349 |
| 实验五十六 | 磁性液体密封容器泄放压的实验研究 .....     | 352 |
| 实验五十七 | 超声波探伤 .....                | 353 |
| 实验五十八 | 声光效应 .....                 | 359 |
| 实验五十九 | 高温超导材料的基本特性 .....          | 363 |
| 实验六十  | 数字信号光纤传输技术 .....           | 367 |
| 实验六十一 | 模拟电子秤 .....                | 375 |
| 实验六十二 | 温度传感器特性及人体温度的测量 .....      | 378 |
| 实验六十三 | 智能化磁性液体纳米颗粒空间分布规律的测量 ..... | 384 |
| 实验六十四 | 硅光电池线性响应的测量 .....          | 391 |
| 实验六十五 | 电冰箱制冷系数的测量 .....           | 395 |
| 实验六十六 | 全息照相 .....                 | 398 |
| 实验六十七 | 用多功能光谱仪研究氢原子光谱 .....       | 405 |

# 第一章 绪 论

## 一、物理实验课程的地位和作用

物理学史上的许多重大发现,都有力地推动了产业革命的发生和社会的变革,而物理学的每一个重大发现和研究成果无不是在实验室里孕育成功的,实验室从来都是众多技术革命的发祥地。

自从以伽利略为代表的一批杰出物理学家创立了“实验物理学”之后,几百年间,人们把物理实验方法与物理规律的研究结合起来,形成了一个完整的科学实验思想体系,把物理实验方法发展到了一个崭新的高度。这些思想体系和实验方法已成为人类伟大科学宝库中的一部分,那些卓越的实验设计、巧妙的物理构思、高超的测量技术、精心的数据处理、精辟的分析判断为我们展示了极其丰富的物理思想和科学方法。今日之学者在领略这些思想和方法时,仍然激动不已。学习这些思想和方法,任何专业的大学生都将终生受益。

20 世纪末,我国高等教育掀起了声势浩大的教育改革浪潮,改革的主要任务就是加强对学生创新能力的培养,而为了培养创新能力,首先就要培养实践能力。十几年来,国家不断加大对实践性教学环节的投资力度,几乎所有大学的物理实验课程都成为国家投资的热点。当年,很多学校都把本门课程作为“重点课程”甚至“核心课程”给予重点扶持。如今,在全国范围内,物理实验室的教学条件都得到了极大的改善,教学水平也有了显著的提高。本门课程在培养创新性人才的浩大工程中正发挥着日益重要的作用。

物理实验是高等学校对学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修课程,是学生进入大学之后,接受系统的实验方法与实验技能训练的开端,也是理、工、医、药、农等各专业学生学习后续实验课程的基础。即使是文科专业的学生,学习一点物理实验知识,对于提高他们自身的综合素质也是有好处的。

## 二、物理实验课程的教学目标

本课程的教学目标是,拟在以下几个方面帮助学生学有所成。

1. 通过对某些物理量的测量,深刻地理解和掌握这些实验方法中蕴含的物理思想,进而提高学生的创新能力。

2. 通过物理实验课的教学活动,增强学生的基本实验技能。这里所说的基本实验技能是指:

通过课前预习,能够编制出“操作程序”,独立地做好实验课的准备工作;能够对实验现象进行分析和判断;正确记录实验数据;正确处理实验数据、绘制图线和表格,撰写出有见解的实验报告;独立完成简单的设计性实验。

3. 提高学生的科学素养主要是指:

严谨的工作作风;实事求是的科学态度;主动探索的创新精神;遵守纪律和爱护国家财产的优良品德。

为达到这一培养目标,学生要主动地学习,实验室要提供完善的服务.教师要把学习和服务二者有机地融合在一起,以取得最佳的教学效果。

### 三、物理实验课程的教学安排

所谓教学安排,就长期过程来说,是教学计划,就短期过程来说,是课堂设计.做好教学安排的主要原则,是要符合学生的实际.教师要主动地了解学生,不仅要知道学生学了什么,还要知道学生是怎么学的,学的效果如何,通过考察学生的学而改进教师的教.对不同的学生提出不同的教学要求,同时在不同的教学阶段应采用不同的教学方法.也就是,在不同的教学阶段应该有不同的课堂设计。

本书作者根据自己的教学改革实践,并汲取了近十年来国内高等学校教学改革的优秀成果,尤其是借鉴国家级实验教学示范中心的教学改革经验,提出了“三段式”的物理实验教学体系,这个“三段式”教学体系构筑了本书的写作框架.所谓“三段式”,就是把整个教学过程分成“基础性实验”“提高性实验”“研究性实验”三个阶段.这一课程体系最显著的特点是,低起点、高台阶,既能适应低年级学生的接受能力,又能达到较高的教学目标。

#### 1. 基础性实验阶段

通过物理实验数据处理方法的讲解和练习,以及几个经典物理实验题目的教学,对学生着重进行了基本实验技能的训练和数据处理能力的训练,使学生对基本物理实验方法有所了解和认识.教师在这一阶段做课堂设计时,应注意采用启发式、引导式的教学方法。

#### 2. 提高性实验阶段

通过对若干物理量的测量,对学生着重培养自主学习的能力和分析解决问题的能力.要求学生通过课前预习,能回答教材中规定的课堂讨论题,独立地提出完整的操作方案.教师在这一阶段做课堂设计时,应注意采用讨论式、提案(提出方案)式的教学方法。

#### 3. 研究性实验阶段

实验室为学生准备了若干带有研究性质的实验题目,学生任选其一,从实验设计到最后答辩,全部由学生独立完成.这一阶段也是考试阶段,着重考查和培养综合素质和能力,包括自学能力、文献检索能力、创新能力、科技写作能力和语言表达能力.教师在这一阶段做课堂设计时,应注意采用研究式、答辩式的教学方法。

### 四、物理实验课的注意事项

#### 1. 预习

完成一个实验包括三个教学环节:课前预习,课堂操作,课后撰写实验报告.课堂

操作是最基本的环节,预习是课堂操作的必要准备,撰写实验报告是实验成果的书面表达。课前预习应做好三件事,一是阅读教材,二是主动到实验室去熟悉仪器,三是写出预习报告。预习报告的内容由学生自己来决定,原则是能帮助自己顺利完成操作。一般情况下,预习报告应包括:测量内容,操作步骤,数据表格,回答课堂讨论题等,在提高性实验阶段,回答课堂讨论题是必需的。把操作步骤写在纸面上,它就成了张操作路线图,可以指导学生有条不紊地完成实验任务,操作者按此程序去做即可,不必再参考教材或其他文件。数据表与操作步骤是密切相关的。数据表中项目栏的排列顺序,应与操作步骤的顺序合理配合,这样,可以随时将实验数据按顺序填入表中,也可以随时观察和分析数据的规律性。有的学生喜欢将数据随便记在纸片上,这种做法反映了实验者心态的浮躁,很容易铸成大错,这种做法在实验课堂上是不允许的。

## 2. 实验操作过程中应遵守的原则

(1) 实验仪器放置的位置必须合理。实验仪器放置在实验台上的位置,应以安全和方便为原则。例如,高压电源的输出端钮应远离操作者,经常需要操作或调节的器件,应放在便于操作的位置上,如砝码盒应放在天平的砝码盘附近。一些电学实验,仪器部件较多,实验者首先要把这些仪器部件一一安排在合适的位置上,然后再连线。这样才能保证实验台上的仪器既安全又方便。实验完成后,应将所有仪器恢复原位,养成良好的实验习惯。

(2) 实验仪器必须处于良好的工作状态。所有仪器必须调整到正确的位置和稳定的状态。在安装和调整仪器时,不得用书本、纸片和木块做垫块,因为这些物品本身就不稳定,容易造成测量数据的分散性,影响实验的质量。

(3) 及时发现和排除故障。仪器在使用过程中,难免会发生故障,使得仪器不能正常工作,或数据失常。这时应立即停止实验,并设法排除故障。如果学生对所用仪器比较熟悉,可以独立排除故障,否则应报告指导教师,待故障排除后,才能恢复做实验。

## 3. 读数

测量仪器从被测对象获得的信息以各种形式输出,最常见的输出形式是,在标尺上按指示器的位置得到读数。读数时要注意以下几点:

(1) 有效数字取位要合理,要读到有误差的那一位。

(2) 读数时要注意消除视差。例如,在读取标尺示值时,眼睛要正对示值刻线的上方;在读取指针式仪表的示值时,眼睛要正对指针的上方;在用助视仪器读取线纹(谱线或条纹)的位置时,要将线纹的像调节到助视仪器的分划板平面上。

(3) 读数时要有足够的耐心。尤其在重复性测量时,不要以为后面的数据一定和前面的数据相同。当指示器再次临近前面的数据时,不要迫不及待地记录读数,因为指示器可能还在缓慢地移动。在记录数据时要实事求是,不要编造所谓“重复性”好的假数据。

(4) 读数出现异常时,应立即停止测量。这时应检查测量仪器是否失调,环境条件是否发生了异常突变。若一时找不到原因,应及时报告指导教师。

## 4. 数据的记录

所有做过的实验都应该有完整的原始记录,它是记载物理实验全部操作过程的

基础性资料。

(1) 建议每一位同学准备一个实验数据记录本,从第一个实验到最后一个实验,所有的实验数据和相关事项都记录在这个本子上。用零星的纸张记录,可能记不全,也可能会丢失。在原始记录里,除实验数据外,还应注明实验日期、实验题目、仪器编号以及操作过程中出现的异常现象等。

(2) 实验数据应记录在表格里。有些同学喜欢将一组数据堆砌在一个地方,将另一组数据堆砌到另外一个地方,到写实验报告时再去整理,这样做很容易造成遗忘和错乱。事先将数据表画好,每次读到一个数据,就把它填写到数据表内相应的空格中,可以使实验者始终保持清醒的头脑,随时知道已经测量了什么,还应测量什么。此外,现代科技论文中的测量数据都是通过数据表的形式来表达的。所以,学会根据测量内容来绘制数据表,也是科技工作者必备的基本技能。如果在一个实验中,有两组以上的数据,则应绘制两个以上的数据表。

数据表应有表题,表题包括表序和表名。表序是按数据表在实验报告中出现的次序用阿拉伯数字所做的编号,从“表1”开始,一直编到最后。若实验报告中只有一个数据表,仍然用“表1”表示。表名是数据表的名称,表名应能确切表达数据表的特定内容,要避免使用泛指性词语,如“测量数据”“数据表”等。例如,测量一个长方体的体积,其数据表的表名可拟为“长方体的几何尺寸”。

(3) 要直接记录原始数据。有些仪表的标尺,没有直接给出测量结果,只给出了分度数,要想得到测量结果,需要换算。在这种情况下,应直接将分度数填入表中,不要先乘以分度值,再将乘积填入表中,以防出错。换算的工作,可在操作完成以后再进行。

(4) 发现了错误的数字,应及时改正,但不允许涂改,更不准用橡皮擦去。正确的方法是在错误的数字上,轻轻划一斜杠,并在旁边写上正确的数字,留下错误数据的笔迹,可能对日后分析测量结果有参考价值。

### 5. 撰写实验报告

实验报告是学生完成某一实验题目的实验总结,是学生展示自己的科学素养和实验技能、发表实验见解的学习性报告,也是培养学生进行科技写作的有效形式之一。根据物理实验教学的特点,并参照国家关于科技论文写作的有关标准和规范,建议在撰写物理实验报告时,应包括如下内容:

(1) 实验题目。实验题目就是实验名称。

(2) 实验仪器。简要介绍测量对象和所用仪器,对大多数实验来说,只要指出仪器的名称、型号和用途就可以了,对仪器无须过多论述。但也有例外,例如,用三线摆测转动惯量、用直流电桥测电阻、用迈克耳孙干涉仪测光波波长等实验,上述实验仪器的结构原理和使用方法就是该实验的教学重点,因此在实验报告中还要对这些仪器工作原理作简要介绍。

(3) 实验原理。简要论述测量的科学依据,给出测量公式及测量原理图,这个测量原理图是指电路图或光路图。

(4) 实验步骤和数据表。这一部分内容是实验报告的精髓,因为在这一部分内容中,集中展现了作者通过测量而获取的实验数据,这些数据是实验报告中最重要、最

基本的素材.写作时,应简要写出主要操作过程,并给出测量数据表.对于操作过程中遇到的问题和故障,以及为解决这些问题和故障而采取的措施,也要作适当的阐述.这个“问题和故障”不易写好,因为这些知识往往在书本上很难找到.正因为如此,才更具有挑战性,才更有利于培养自己的探索精神和创新精神.

(5) 数据处理和结果报告.这一部分内容是实验报告的核心,因为在这一部分内容中,集中展现了作者的实验成果.如果说,实验数据是实验报告的基础性材料,那么,实验结果就是实验报告追求的最终目标.通过测量而得到实验数据,通过数据处理而得到测量结果和测量不确定度,数据处理方法正确与否,直接决定了测量结果的质量.因此,这一部分内容写作的质量也是决定该项实验成败的关键因素之一.数据处理是本门课程的教学难点之一,在本教材中,专辟一章来阐述物理实验数据的处理方法,在基础性实验题目中,都附有数据处理示例.如果学生在处理实验数据时遇到困难,只要认真阅读相关内容,相信这些困难自会迎刃而解.

(6) 问题讨论.在大多数情况下,教师不会为撰写实验报告规定讨论题,因此,这个小标题就成为学生自由发挥的天地.学生可以讨论在实验中自己感兴趣的任何问题,可以谈收获、体会,也可以对实验的教学内容和教学方法提出建议,甚至还可以对教学管理中的问题提出质疑.

## 五、基本物理实验方法简述

测量的目的是为了获得被测量的真值.物理实验的目的是为了理解和探索物理规律,而为了研究物理规律必须对相关的物理量实施测量.这样来看,“测量方法”与“物理实验方法”这两个概念就有共同之处——通过一定的手段将被测量求出来.两者也有不同之处,一般来说,物理实验方法只限于物理学科,而测量方法适用所有学科领域,除物理测量外,还包括化学测量、生物测量、电子测量、机械测量、土木测量、大地测量,等等.但是物理实验方法中所蕴藏的物理思想适用于所有的测量领域.实践证明,现代科技的许多重大研究成果,都是通过物理手段取得的.本节所讨论的“基本物理实验方法”不是针对某一物理量而实施的具体方法,也不是为了讨论某些具体的实验方法,而是在迄今为止已出现的成千上万个精彩纷呈的物理实验方法中,深入领会这些方法的物理思想,根据这些物理实验方法的本质特征进行归纳和分类,把归类以后而得到的物理实验方法称为基本物理实验方法,如直接比较测量法、放大测量法、转换测量法、替代测量法、模拟测量法等,这些基本物理实验方法是人类科学智慧的宝库,它为人类科技的发展创下了丰功伟绩.它不仅适用于物理学科,一切科技领域中测量方法的探索和创新都离不开这些基本物理实验方法的运用.

### 1. 直接比较测量法

将被测量直接与已知其值的同种量相比较,以确定被测量值的测量方法,称为直接比较测量法.例如用线纹尺测长度、用量角器测角度、用等臂天平测质量.这种方法测量的准确度决定于“已知其值的同种量”的准确度等级.例如,长度测量的准确度决定于线纹尺的准确度等级、质量测量的准确度决定于砝码的准确度等级.在木制家具

的制造工艺过程中,测量长度时只要一把卷尺就够用了,而在机械零件制造工艺过程中,测量长度时必须根据工件的质量要求选择不同等级的线纹尺或其他量具。

比较测量法是最基本、最普遍的测量方法,除直接比较外,还有间接比较,在放大法、转换法、替代法和模拟法中都离不开比较法的运用。

## 2. 放大测量法

将被测量放大,或将被测量对观测者的视觉效应放大后再进行测量,以确定其值的测量方法,称为放大测量法。有时被测量十分微小,难以直接测量或直接测量误差较大时,常采用放大测量法,根据放大方式的不同又分为累积放大法、机械放大法、电子学放大法和光学放大法。

### (1) 累积放大法

当被测量能够进行简单叠加,或能多次连续重复时,可以使用累积放大法。例如用千分尺测量一张约 0.1 mm 厚度的纸,读数为 0.122 mm,测量误差为 0.004 mm,相对误差约 4%。若将同样规格的 100 张纸叠加起来,读数就可能成为 12.231 mm。累积测量误差仍为 0.004 mm,可以计算出每张纸的厚度为 0.122 31 mm,测量误差为 0.000 04 mm,测量准确度提高了 100 倍。同理,测量单摆周期时,为了提高准确度,不应只测量一个周期的时间间隔,而应测量连续 100 个或 50 个周期的时间间隔,这样,测量的准确度可以提高 100 倍或 50 倍。

### (2) 机械放大法

利用机械传动原理,将量具标尺上的刻线间隔放大后再读数的方法,称为机械放大法。例如,一个金属垫片,用线纹尺测量读数为 2.5 mm,用千分尺测量读数为 2.498 mm,后者比前者增加了两位有效数字。这是因为千分尺的测量机构把螺杆上的毫米刻度线的间隔又分成了 100 个刻线,等分在微分筒上,相当于把毫米间隔放大了 100 倍。

### (3) 电子学放大法

将被测量用电子学的方法放大后再测量的方法,称为电子学放大法。这种方法在电子技术中应用十分广泛。例如,放大检波电压表,因检波器前加有交流放大而得名。由于被测信号先放大,故提高了测量的灵敏度。

### (4) 光学放大法

将被测物体用助视仪器进行视角放大然后再测量的方法,称为光学放大法。这种方法常用在被测物体十分微小或被测物体距离较远,人眼无法分辨的情况下。近视镜和远视镜就是一种最简单的助视仪器,实验室常用的助视仪器有读数显微镜、望远镜、平行光管等。

测金属丝的微小伸长量所用的光杠杆,是机械放大与光学放大相结合的器件(见实验十七)。

## 3. 转换测量法

把被测对象依据物理规律转换为另一个被测对象的方法,称为转换测量法。转换测量法的物理本质是通过转换测量对象,把看起来不可测的量转化为可测的量,或把看起来不可能测准的量准确地测量出来。

例如,不规则物体的体积在量筒出现以前,似乎也是不可测量的量,量筒的出现,把

对体积的测量转换为对量筒中水面上升高度的测量.但是这种测量方法误差很大,为了提高测量的准确度,又出现了一种新的测量方法:利用天平及其浮力系统,根据阿基米德定律,将体积的测量转换为对浮力的测量,又转换为对质量的测量(见实验二).

转换测量法在实验室中应用的例子举不胜举.例如水银温度计根据热胀冷缩的原理,把温度的测量转换为毛细管中水银高度的测量;热电偶根据温差电理论将温度的测量转换为电势差的测量(见实验二十四);换能器根据压电晶体的压电效应将机械波的测量转换为电压波的测量(见实验二十九);示波器根据热电子发射,电子束在电场作用下的偏转及电致发光等一系列物理过程,将电压波的测量转换成几何图形的测量(见实验五);牛顿环器件通过等厚干涉原理把球面曲率半径的测量转换成干涉图样几何尺寸的测量(见实验八).

上述被测对象的转换,有的是靠某种器件,有的是靠某种装置,通常把这些转换器件称为传感器.传感器的共同特点是,能直接感受被测量的作用,并能按一定规律将被测量转换成同种或别种可测的信号.由于转换测量法的巨大优越性,成千上万种新型传感器不断涌现.如今,传感器技术几乎进入了所有的技术领域.按传感器能感受的被测量的属性来分,有物理量传感器,化学量传感器和生物量传感器等几大类.物理量传感器又包括测重传感器(应变计式、电容式、磁阻式、压阻式、压电式)、压力传感器(应变片式、金属箔式、电感式、霍耳式)、位移长度传感器(光栅式、磁栅式、光纤式、超声式、光电式)、密度传感器(射线式、振动式、浮子式)、黏度传感器(超声波式、旋转式)、热传感器(热电偶、热敏电阻、热电阻、双金属片、光纤)、磁传感器(霍耳元件、光纤磁传感器、磁敏电阻)、光传感器(光电管、光敏电阻、光敏二极管、光电池、CCD 图像传感器)等.

#### 4. 替代测量法

将已知其值的同种量替代被测量,使这个同种量在指示装置上得到相同的效应,以确定被测量值的测量方法,称为替代测量法.古代曹冲称象的故事就包含了替代法的朴素思想.聪明少年曹冲,得到国王的命令,让他把一头大象的体重测出来.在当时的技术条件下,这件事似乎比登天还难.曹冲经过昼思夜想,终于想出了一个好办法:他用一艘船和一堆石头作为测量工具,用一堆石头来替代大象,比较大象登船后船体的吃水深度和石头装船后的吃水深度,他断定,当两者吃水深度相同时,石头的总重量就是这头大象的体重.在现代的物理测量中使用替代测量法,可以有效地抵偿由于测量仪器不完善而造成的系统误差.例如,使用天平测质量时,天平的不等臂性会造成较大的系统误差,为了抵偿这一误差,常使用替代法,这就是著名的波尔代法.

波尔代法的测量程序是:首先,将被测物  $X$  放在天平的右盘,平衡物  $A$  (可用砝码,也可用其他能连续改变质量的物质)放左盘,改变  $A$  的质量,使天平平衡.然后,用一组标准砝码  $B$  替代  $X$ ,增加或减少  $B$  的质量,使天平第二次平衡,此时  $m_X = m_B$ .

又如,为了抵消箱式电桥不完善所造成的系统误差,也常使用标准电阻箱来替代被测电阻.再如,测表头内阻时,由于表头不允许通过较大的测量电流,也经常使用替代法(见实验十八).替代法测量结果的准确度决定于两个因素,一是替代物(上述两

种情况中替代物分别是标准砝码和标准电阻箱)量值的准确度,二是指示装置的灵敏度.第二个因素常被忽视,误以为只要替代物的准确度高,测量结果的准确度一定也高,其实不然.一般情况下,零位平衡指示仪器的灵敏度较高,所以在天平上或电桥上使用替代法效果较好,而测表头内阻时,指示装置是一台电流表,测量中会发现,当改变替代物——标准电阻箱的阻值时,指示电表的指针反应比较迟钝,必然造成较大的读数误差.尽管如此,有时在非零位平衡指示仪表上使用替代法仍然有很大的优越性.大连市某高校 99 级学生,只用一只万用表和一台标准电阻箱,用替代法测出了电阻的阻值,测量结果的准确度比用万用表提高了一个数量级.其测量程序是,首先,将被测电阻  $R_x$  接入万用表欧姆挡的测量端钮,此时表针指示为  $n$ ,然后用标准电阻箱  $R_0$  替代  $R_x$ ,调节  $R_0$  的大小,当指针再次指向  $n$  时,  $R_x = R_0$ .这位学生的这一成果,得到了指导教师的赞扬,值得赞扬的不仅是这个方法本身,更可贵的是学生在学习过程中表现出的创新精神.

### 5. 模拟测量法

根据相似性原理,人为地制造一个类似于被测量的模型,通过测量这个模型来获得测量结果的方法,称为模拟测量法.根据模拟手段的不同又分为几何模拟法、替代模拟法和计算机模拟法.

#### (1) 几何模拟法

有时被研究的对象十分庞大,或造价十分昂贵,为了取得设计的参量,事先制作一个按比例缩小的模型,对模型进行测量.例如要建一座大坝,在设计阶段要在水工实验里建造一座按比例缩小的河床和坝体,然后通以流水进行各种参量的测量,所取得的数据可以作为设计的依据.

据报道,日本在设计一座新的大型音乐厅时,为了取得声音传播以及声音与厅内各种物体的相互作用的各种参量,曾用十分之一的模型,在不同部位装上各种传感器进行测量.几何模拟法的显著优点是,能节省人力、物力和财力,得到的数据也比较可信.

#### (2) 替代模拟法

利用物理量之间物理性质或物理规律的相似性或等同性进行模拟的方法,称为替代模拟法.例如,为了测绘静电场中的电场线分布,可以用恒定电流场来模拟静电场,用恒定电流场的测量替代静电场的测量.采用这种模拟方法有两点理由,一是静电场不易测量,二是两种场中的电势分布具有相同的数学表达式(见实验七).

用偏光弹性仪来测量机械零件或建筑构件的应力分布,是几何模拟与替代模拟结合应用的例子.首先用有机玻璃或其他透明材料按被测工件的形状制成相似的模型,然后把这个模型作为试件,放在偏光弹性仪上施加所需的外力.在外力作用下,试件发生形变,造成试件内部各处的密度及折射率的变化,偏振光通过时,在试件内部产生彩色条纹,根据条纹的颜色及疏密分布,就可以知道试件内部的应力分布.

#### (3) 计算机模拟法

由于计算机仿真技术的迅速发展,用计算机对物理过程作数字模拟,已经成为普遍采用的方法.