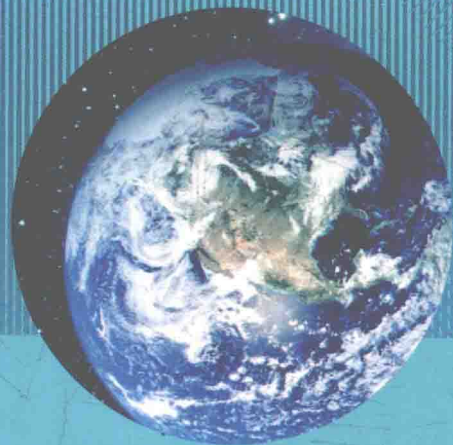


高等学校物理实验教学示范中心系列精品教材

# 大学物理实验

◎主 编 林伟华

◎副主编 邹 勇 周嘉萍



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 林伟华

◎副主编 邹 勇 周嘉萍

University

Physics Experiments

高等教育出版社·北京

## 内容提要

本书是武汉大学物理科学与技术学院为大学物理实验课程编写的教材。全书共分五章,第一章讲述物理实验基础知识,主要包括测量误差、不确定度、数据处理和常用实验仪器介绍;第二章、第三章、第四章按照力学与热学、电磁学、光学进行分类,介绍了31个基础性物理实验,以巩固和加强学生的实验技能训练;第五章介绍了25个综合性与设计性实验。这些实验中,既有经过长期教学实践、内容比较成熟的实验,又有自行研发的新实验,这有利于使学生在实验方法、实验技术方面得到训练,以及培养其个性发展和提高创新能力。

本书可作为高等学校理工科非物理专业大学物理实验课程的教材或参考书,也可以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 / 林伟华主编. -- 北京: 高等教育出版社, 2017.11

ISBN 978-7-04-048708-4

I. ①大… II. ①林… 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 246405 号

Daxue Wuli Shiyān

策划编辑 程福平  
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 高聚平  
责任校对 刘娟娟

封面设计 张申申  
责任印制 刘思涵

版式设计 马云

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 河北鹏盛贤印刷有限公司  
开 本 787 mm×1092 mm 1/16  
印 张 23  
字 数 560千字  
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11月第1版  
印 次 2017年11月第1次印刷  
定 价 41.60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 48708-00

# 前 言

大学物理实验课程是高等学校理、工、农、医等专业必修的基础课程,是大学生进入大学后接受实验方法和实验技能系统训练的开始,是培养学生的创新能力和实践能力、提高学生科学素质的极其重要的教学环节。武汉大学国家级物理实验教学示范中心在“激发兴趣、夯实基础、增强能力、探索创新”的教学方针引导下,紧跟时代步伐,积极改革实验教学内容,大力引进新技术、新成果开设新实验,使基础实验在与时俱进中不断更新,取得了一定的效果。本教材就是总结这些经验并吸收兄弟院校的宝贵经验编写而成的。

全书共分为五章,第一章讲述了测量误差、不确定度和数据处理的基础知识,以及常用物理实验仪器和实验安全常识,所涉及的内容以本课程必须掌握的基本要求为主。第二至第四章为基础物理实验(共选编了31个实验),包含了力、热、电、磁、光方面的基本实验内容。第五章为综合性与设计性实验(共选编了25个实验),这类实验涉及相关的综合知识或综合性实验方法、手段,是对学生的知识、能力、素质形成的综合培养,特别是设计性实验,是在学生做了一定数量的基本实验,能对实验方法、仪器使用等方面做出恰当评价后,为培养学生自主地进行科学实验的初步能力而设置的。这样分层次的安排,既保证了基本训练,又提高了物理实验的综合性 and 实用性,既能促使学生更积极地完成实验,又有利于学生的个性发展和创新能力的培养。

本书主要面向高校非物理类的理、工、农、医等专业的学生,考虑到物理实验课的独立性和面向低年级学生的特点,对于基础实验(第二章至第四章),编写时力求将实验原理叙述清楚,计算公式推导完整,使学生在实验时能掌握理论依据;实验内容与步骤亦尽可能具体,以加强对基本实验技能和基本实验方法的指导和训练;另外,大部分基础实验项目还提供了不确定度的计算步骤。一般来说,每个基础性实验的课堂学习任务可在3~4学时内完成,部分实验有多个学习内容,教师可在安排时进行取舍,也可供学有余力的优秀学生选做。对于综合性和设计性实验,编写时不局限在统一的格式上,有的重点放在新概念、新思路或原理的阐述上,有的则不过分强调理论上的完整,而将主要内容放在实验方法和技巧的指导上,特别是设计性实验,有的只提出研究对象、实验任务和基本要求,让学生查阅相关资料,自行设计实验方案,选择仪器用具,完成实验测试,以更多地发挥学生的主观能动性和创造性。这部分实验根据各题目内容的不同,一般可安排课内4~12学时完成,当然也允许有兴趣的学生利用课外开放时间进一步深入探索。全书的多数实验项目附有思考题和习题,以引导学生在预习时开展思考,实验后进一步分析讨论,巩固和开阔所学知识。

武汉大学物理科学技术学院物理实验教学中心经历几十年的教学实践,期间对物理实验室和大学物理实验项目进行多次调整、更新和扩充,才达到目前的规模和水平。实验教材也在不断更新,本教材是在武汉大学马茂清教授主编的《物理实验教程》、潘守清教授主编的《大学物理实验》、周殿清教授主编的《大学物理实验教程》以及李长真教授主编的《大学物理实验教程》的基础上,吸收我校近九年来物理实验教学改革的成果和兄弟院校实验教学的经验而编写的。本书

是集体创作的结晶,它凝聚了武汉大学物理实验教学中心全体教师和实验技术人员的智慧和辛勤劳动。参加本次编写工作的教师除主编外,有邹勇(第三章:实验 3.1、3.4、3.5、3.6、3.7、3.11、3.12,第五章:实验 5.7、5.10)、周嘉萍(第二章:实验 2.2、2.3、2.4、2.6、2.8,第五章:实验 5.1、5.3、5.5)、程放(第三章:实验 3.2,第五章:实验 5.2、5.4、5.8、5.13、5.14)、黄慧明(第四章:实验 4.2、4.3、4.4、4.6、4.8、4.9,第五章:实验 5.24)、艾志伟(第二章:实验 2.1、2.5、2.7、2.9)、蔡光旭(第四章:实验 4.1、4.10,第五章:实验 5.20、5.21、5.22、5.23、5.25)、王豪(第三章:实验 3.3、3.8、3.9、3.10,第五章:实验 5.6、5.9、5.11、5.12)。全书由林伟华统稿。

本书在编写过程中征求了许多实验指导教师的意见,参考并吸收了兄弟院校的有关资料和经验;武汉大学物理科学与技术学院的领导和许多资深教授对本书的编写给予了极大的支持和鼓励;高等教育出版社的编辑们为本书的出版做了巨大的贡献。借此表达对他们的诚挚敬意和衷心感谢!

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免有疏漏谬误之处,恳请读者和同行专家批评指正。

编 者

2017年5月于武汉大学

# 目 录

绪论 .....	1	实验 3.10 $RLC$ 电路的暂态特性 .....	157
第一章 物理实验基础知识 .....	4	实验 3.11 用电磁感应法测交变磁场 .....	163
第 1 节 测量与误差 .....	4	实验 3.12 霍耳效应 .....	169
第 2 节 测量不确定度 .....	14	第四章 光学实验 .....	178
第 3 节 物理实验有效数字处理 .....	23	实验 4.1 薄透镜焦距的测定及透镜 成像的应用 .....	178
第 4 节 常用实验数据处理方法 .....	26	实验 4.2 分光计的调节与使用 .....	184
第 5 节 常用物理实验仪器 .....	34	实验 4.3 等厚干涉及应用 .....	192
第 6 节 物理实验安全常识 .....	50	实验 4.4 迈克耳孙干涉仪 .....	197
习题 .....	52	实验 4.5 用双棱镜测定光波波长 .....	206
第二章 力学与热学实验 .....	54	实验 4.6 衍射光栅 .....	211
实验 2.1 用三线摆测物体的转动惯量 .....	54	实验 4.7 超声光栅及应用 .....	217
实验 2.2 弹簧振子的简谐振动 .....	59	实验 4.8 光的偏振 .....	221
实验 2.3 声速的测定 .....	64	实验 4.9 光电效应 .....	226
实验 2.4 光杠杆装置测定钢丝的 杨氏模量 .....	71	实验 4.10 光电探测器基本特性的 测量 .....	233
实验 2.5 用拉脱法测液体的表面 张力系数 .....	78	第五章 综合性与设计性实验 .....	243
实验 2.6 液体黏度的测定 .....	83	实验 5.1 音叉的受迫振动 .....	243
实验 2.7 冷却法测量金属的比热容 .....	90	实验 5.2 超声测厚 .....	247
实验 2.8 金属线膨胀系数的测量 .....	94	实验 5.3 杨氏模量的动态法测定 .....	251
实验 2.9 热电偶温度计的标度 .....	96	实验 5.4 多普勒效应综合实验 .....	256
第三章 电磁学实验 .....	100	实验 5.5 易溶于水的颗粒状物质的 密度测定 .....	260
实验 3.1 电学元件伏安特性的测量 .....	100	实验 5.6 密立根油滴实验 .....	262
实验 3.2 电表的改装与校正 .....	104	实验 5.7 氩原子第一激发电势的 测定 .....	267
实验 3.3 用补偿法测量电压、电流和 电阻 .....	110	实验 5.8 $p_n$ 结特性综合实验 .....	273
实验 3.4 示波器的原理及应用 .....	116	实验 5.9 用非线性电路研究混沌 现象 .....	277
实验 3.5 直流电桥测电阻 .....	124	实验 5.10 非平衡直流电桥及应用 .....	281
实验 3.6 交流电桥 .....	130	实验 5.11 数字温度计的设计与制作 .....	297
实验 3.7 交流电路的谐振 .....	135	实验 5.12 用示波器测量铁磁材料的	
实验 3.8 $RLC$ 串联电路的测量与分析 .....	142		
实验 3.9 $RLC$ 电路的稳态特性 .....	149		

磁滞回线 .....	299	实验 5.19 空气折射率的测定 .....	327
实验 5.13 太阳能电池性能研究综合 实验 .....	301	实验 5.20 光学材料折射率的测定 .....	330
实验 5.14 风力发电实验仪 .....	307	实验 5.21 用光学多道分析器研究氢原子 光谱 .....	339
实验 5.15 利用双光栅 Lau 效应测量 折射率 .....	317	实验 5.22 光纤温度传感特性的研究 .....	343
实验 5.16 利用 Lau 效应测量凸透镜 焦距 .....	319	实验 5.23 光纤位移/压力传感特性的 研究 .....	346
实验 5.17 利用双光栅 Lau 效应测量 光波波长 .....	321	实验 5.24 压电器件特征参数的光学 测定 .....	349
实验 5.18 基于表面等离子激元共振测量 液体折射率 .....	323	实验 5.25 光拍频法测量光速 .....	353
		附录 .....	359

# 绪 论

物理学是自然科学的基础,物理学的每一次重大突破,不仅带来了物理学新领域、促进了新方向的发展,而且推动了化学、生物和医学等各学科向更深层次发展,并导致新的分支学科、交叉学科和新技术学科的产生;物理学的发展又是技术创新的重要源泉,每一次工程技术的新突破都离不开物理学的新发现;物理学的思想方法和取得的成就,改变了人类对宇宙和自然的认知观和思维方式,彻底影响了人类社会.不可否认的是,物理学从本质上说是一门实验科学,物理概念的建立和物理规律的发现都以严格的实验事实为基础,并且不断受到实验的检验.在物理学发展和应用的过程中,人类积累了丰富的实验方法,设计制造出各种精密巧妙的仪器设备,从而使物理实验课程有了充实的实验内容.

实践证明,物理实验课程在培养学生独立从事科学技术工作的能力、理论联系实际的分析综合能力与思维和表达能力等方面均具有独特的优势.所以说,“物理实验”这门课程不仅仅是向学生传授知识和技能,更重要的是培养学生开拓性研究的能力.所以在物理实验课的实验实习过程中,同学们要在学习物理实验的基本知识、基本方法、基本技能的基础上,注意培养创造性地从事科学实验的物理思维能力,要养成良好的实验素质,如良好的观察习惯和正确地记录数据的方法,以及对实验结果的分析与思考等.

## 一、物理实验课的教学目的

本课程的重点是对学生在物理实验理论、实验方法和实验技能方面进行系统的基本训练.这种训练既为学生学习后续课程打下坚实和广泛的基础,更为今后参加科学研究、技术开发应用建立长期受用的潜在能力和创新能力.拟在以下三个方面帮助学生学有所长:

1. 学习和掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能.通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,使学生能运用物理学原理和物理实验方法研究物理现象和规律,加深对物理学原理的理解.

2. 培养与提高学生的科学实验能力,其中包括:

自学能力:能够自行阅读教材或参考资料,正确理解实验内容.做好实验前的准备.

动手实践能力:能够借助教材和仪器说明书,正确调整和使用常用仪器.

思维判断能力:能够运用物理学理论,对实验现象进行初步的分析和判断.

书写表达能力:能够正确记录和处理实验数据、绘制图线;说明、分析实验结果,撰写规范的实验报告(或以科学论文的形式撰写报告).

简单的设计能力:能够根据课题要求,确定实验方法和条件,合理地选择仪器,拟定具体的实验程序,正确地完成实验任务.

3. 培养与提高学生的科学实验素质,使学生逐步养成理论联系实际、实事求是的科学态度,严谨踏实的工作作风,勇于探索、坚韧不拔的钻研精神和遵守纪律、团结协作、爱护公共资源的优



良品德.

## 二、物理实验课的基本程序

大学物理实验课程是一门基础实验课,也是学生在教师指导下独立进行操作、测试的一项实践性活动.为了更好地遵循教学规律,循序渐进地实现物理实验课程的教学目的,将本课程的基本程序分为以下三个主要环节:

### 1. 课前预习

课前认真阅读教材中有关内容(必要时还需查阅有关参考资料),在理解本次实验的目的、原理的基础上,弄清楚要观察哪些现象,测量哪些物理量,要明确哪些是直接测量量,哪些是间接测量量,用什么方法和仪器来测定,在此基础上写出预习报告.预习报告内容包括:①实验目的(参考教材、并结合自己对实验的理解写);②实验原理(在充分理解教材内容之后,用自己的语言概括性地叙述实验的基本原理和测量方法,包括理论依据、公式推导、原理图、光路图等);③实验仪器(根据实验内容的需要列出本实验所需的仪器,并尽可能地标明仪器型号等);④数据记录表格(根据测量数据的需要,可在原始数据记录单上先画制表格,待实验课测量时记录数据,经任课教师检查无误并签字后再抄写在实验报告相应的栏目内)等.

### 2. 课堂实习

课堂实习是实验课的重要环节,学生进入实验室后应按下列要求进行实验:

(1) 听课 认真听取教师对本实验的讲解,特别注意实验的要求、重点、难点及注意事项等.

(2) 熟悉仪器 对照仪器,仔细阅读有关仪器的使用说明和操作注意事项,并通过对比器的了解进一步明确本实验的具体要求.

(3) 仪器调节 在力学、热学实验中,一些仪器使用前往往需要调至水平或竖直状态,要注意测量仪器设备的零点,若某些仪器不能调零,则要记录仪器的零点值.在电磁学实验中,连接电路前,应考虑仪器设备的合理摆放,电路连接好后,还要注意把仪器调节到“安全待测状态”,然后请教师检查,确定电路连接正确无误后方可接通电源进行实验.光学实验的仪器调节尤其重要,它决定了实验能否顺利进行和测量结果是否精确可靠,一定要细心调节仪器至所要求的工作状态.

(4) 观察与测量 实验中必须仔细观察、积极思考、认真操作、防止急躁.要在实验所具备的客观条件(如温度压力、仪器精度)下,认真地、实事求是地进行测量.要初步学会分析实验,遇到问题时应冷静地分析和处理;仪器发生故障时,也要在教师指导下学习排除故障的方法;在实验中要有意识地培养独立工作的能力.

(5) 记录数据 实验数据记录是计算结果和分析问题的依据,在实际工作中则是宝贵的资料.要把实验数据细心地记录在预习报告的数据表格内.记录时要用钢笔或圆珠笔,不要用铅笔.如果确实记错了,也不要涂改,应轻轻画上一道,在旁边写上正确值,使正误数据都能清晰可辨,以供在分析测量结果和误差时参考.切勿先将数据记录在草稿纸上,然后再誊写到原始记录单的表格内,这是一种不科学的习惯.此外,还应记录环境温度、湿度、气压等实验条件,仪器型号规格与编号及实验现象等.

总之,在课堂实习中希望同学们不要只会按照教材的实验步骤被动地去做实验,而要在弄懂

原理的基础上边思考边做实验;不应片面追求快速完成数据测量,而应注重分析实验现象和所遇到的问题;应独立完成实习而不是依赖他人完成实习,否则,对实验者收效甚微。

### 3. 课后小结(撰写实验报告)

实验报告是实验者工作成绩的总结,应在充分理解实验原理、分析实验现象的基础上撰写,既要全面又要力求简单明了,同时用语确切、字迹工整,图表美观、规范.这些都可作为实验者工作能力的一种训练.实验报告内容如下:

- (1) 实验名称、实验者姓名、日期等.
- (2) 实验目的.参考教材及自己对实验的理解写.
- (3) 实验仪器.列出实际实验中所用的仪器、型号等.
- (4) 实验原理.用自己的语言概括性的叙述实验的基本原理和测量方法,包括理论依据、公式推导、原理图(光路图)等,不要抄书.
- (5) 实验内容.条理分明地概要说明实验的主要程序和步骤,观察到的实验现象,所用的测量方法,测量的物理量等.
- (6) 数据记录与处理.将正确的原始记录数据转记在实验报告上(原始记录单也要附在报告上,以便教师检查),该列表的要列表,该作图的要作图.数据处理时,按照有效数字的运算法则进行,并求出结果的不确定度,正确运用不确定度表示实验结果.
- (7) 结果及讨论.该部分要明确给出实验结果,并对结果进行讨论(如实验现象分析、误差来源分析、实验中存在问题讨论等),也可对实验本身的设计思想、实验仪器的改进等提出合理的建设性意见.
- (8) 课后习题.回答所布置的实验习题.

## 三、实验制度

为培养学生良好的实验素质和严谨的科学态度,保证实验顺利进行和进一步提高教学质量,特制定以下实验制度:

1. 实验前必须认真预习,写出预习报告,经教师检查同意方可进行实验.
2. 上课时不准迟到、不准无故缺课.无正当理由迟到 15 分钟者要扣分;迟到超过 30 分钟者,教师有权取消其本次实验资格;无故缺席者本次实验成绩为零分.
3. 必须严格按照实验要求和仪器操作规程,积极认真地进行实验,并做好相关实验记录.
4. 爱护仪器设备,不得随意从其他组乱拿仪器,不准擅自拆卸仪器;仪器发生故障应立即报告,不得自行处理;仪器如有损坏,照章赔偿.
5. 遵守课堂纪律,保护安静的实验环境.
6. 做完实验,经教师审查测量数据并签字后,学生应将仪器整理还原,将桌面和凳子收拾整齐,方可离开实验室.
7. 按时完成实验报告,并在实验后一周内交实验室.

# 第一章 物理实验基础知识

物理实验融汇了物理原理学习、仪器操作使用、数据测量、数据处理、误差分析以及对物理原理深入探讨等过程,每个过程都至关重要.针对每个物理实验会有相应的物理原理、实验仪器的介绍,而误差、不确定度及数据处理等相关知识不仅在每个物理实验中要用到,而且对于今后从事科学实验也是必须了解和掌握的,本章从教学的角度出发,介绍测量误差、不确定度、实验数据处理、结果表达等.其中误差、不确定度等内容涉及面较广,深入的讨论需要有丰富的实践经验和较多的数学知识,仅通过一两次学习就完全掌握较困难,实验者对相关内容有了一定了解后可结合具体实验再仔细阅读有关内容,通过实际运用逐步掌握.

在物理实验中,一些非电学量通常利用各种传感器转化为电学量,用电学方法进行测量,为了使同学们能更有效地进行实验,提高学习效果,本章第 5、6 两节将集中介绍各类型实验仪器的基础知识以及实验安全常识,供同学们阅读,以期达到有效指导实验的目的.

通过本章的学习及在今后的实验中运用,要求达到如下要求:

1. 建立测量误差和不确定度的概念,正确估算不确定度,懂得如何正确完整地表达测量结果;
2. 掌握列表法、作图法、逐差法和回归法等数据处理方法;
3. 了解有效数字与不确定度的关系,掌握有效数字的运算规则;
4. 了解系统误差对测量结果的影响,学习发现某些系统误差,减小系统误差及削弱其影响的方法;
5. 掌握一些必要的物理实验仪器使用知识和实验室安全知识.

## 第 1 节 测量与误差

物理实验以测量为基础,由于仪器、方法、条件、人员等因素的限制,对一物理量的测量不可能达到无限精确,也就是说在测量中存在误差是不可避免的,而掌握一定的测量误差基本知识,有助于在实验中能获得正确的测量值.

### 一、测量

所谓**测量**,是将预定的标准与未知量进行定量比较的过程.为了使结果具有一定的意义,在测量过程中必须满足如下两个条件:

- ① 预定的标准必须是人们所公认的已知精确量;
- ② 用以进行这种定量比较的仪器设备和程序必须能被证明是正确的.

一切测量必定是在以多种物理因素为特点的、可能对测得值产生影响的一定测量条件下进行的,我们把观察者、测量对象、测量仪器、测量方法及测量条件统称为**测量要素**.进行测量时,观

察者对确定的测量对象,必须利用适当的测量装置、仪器或设备,并运用正确的测量方法.

## 二、测量的分类

根据测量方式、测量条件的不同,习惯把测量进行简单分类,如:直接测量和间接测量、等精度测量和不等精度测量等.而在实际的测量中,根据需要还提出了比较、放大、补偿、模拟、转换等多种不同的测量方法.

### 1. 直接测量和间接测量

**直接测量**是指无需将待测量与其他实测的量进行函数关系的辅助计算,而是与基准或标准直接进行比对,从而直接读出待测量是标准单位的倍数.例如,用米尺测量长度、用天平称质量、用秒表测定时间、用电流表测电流、用电压表测量电压等都是直接测量.

为了进行统一的定量比较,国际计量组织对基本物理量的计量单位都做了明确规定(见表 1.1.1 和表 1.1.2),人们依据这些标准制成一定单位刻度的量具、仪器或仪表,以便直接读取待测量的数值.

表 1.1.1 国际单位制基本单位

	物理量	单位名称	单位符号	定义
基本单位	时间	秒	s	1 s 相当于 <sup>133</sup> Cs 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9 129 631 770 个周期的持续时间(1967 年国际计量大会)
	长度	米	m	1 m 是光在真空中于(1/299 792 458)s 时间间隔内所经路程的长度(1983 年国际计量大会)
	质量	千克	kg	1 kg 等于国际千克原器的质量(1889 年国际计量大会)
	温度	开[尔文]	K	1 K 是水的三相点热力学温度的 1/273.16
	电流	安[培]	A	在真空中,在截面积可忽略的两根相距 1 m 的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时,若导线间相互作用力在每米长度上为 $2 \times 10^{-7}$ N,则每根导线中的电流为 1 A.
	物质的量	摩[尔]	mol	摩尔是一系统的物质的量,该系统中所包含的基本单元数与 0.012 kg 碳-12 的原子数目相等
	发光强度	坎[德拉]	cd	坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度,该光源发出频率为 $540 \times 10^{12}$ Hz 的单色辐射,且在此方向上的辐射强度为 (1/683) W/sr.

表 1.1.2 国际单位制的辅助单位

	物理量	单位名称	单位符号	定义
辅助单位	平面角	弧度	rad	1 rad 是圆内两条半径在圆周上所截弧长与半径相等时这两条半径之间的平面角
	立体角	球面度	sr	1 sr 定义为顶点位于球心,在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形的面积对应的立体角

在实际测量中,对许多物理量,没有直接测其值的仪器,对于这些物理量,可以利用它与另外一些可直接测出的物理量之间的函数关系间接求取,这种测量称为间接测量.例如,测定某地的重力加速度  $g$ ,可以采用单摆装置,直接测得单摆摆长  $l$  和单摆周期  $T$ ,利用单摆的周期公式求出  $g=4\pi^2 l/T^2$ ,此  $g$  即为间接测量量.

应该指出,为了确定实验手段或方法的可行性,检验实验仪器或装置的稳定性、重复性,判断实验结果的可靠性,同时验证物理规律的正确性,对间接测量量,往往不仅应该在宏观条件基本相同的情况下进行多次重复测量,而且需要人为的改变环境条件,变更测量仪器、变换测量方法、重选实验参量乃至调换观测者,反复测量多次.

## 2. 等精度测量和不等精度测量

如果对某一物理量进行多次重复测量,而且每次测量的条件都相同(同一测量者、同一组仪器设备、同一种实验方法、温度和湿度等环境也相同),那么我们就没有任何依据可以判断某一次测量一定比其他次测量更准确,所以每次测量的精度只能认为是具有同等级别的,我们把这样进行的重复测量称为等精度测量.在诸多测量条件中,只要有一个发生了变化,这时所进行的测量,就称为不等精度测量.一般在进行多次重复测量时,要尽量保持为等精度测量.

## 三、读数规则

一切物理测量最终将转化为对某些物理量的直接测量.为了做好实验、获得可靠的测量数据,除了养成良好的读数习惯、尽量减少视差外,还应有正确的读数方法.由于仪器的可读度取决于采用模拟显示的仪表和观测者,所以,当对观测者提出正确的读数要求时,也应区别不同仪器,因此,对不同的仪器有如下不同的规则:

① 对于一般线性刻度的仪器仪表(如连续式的),应估读至其分度值的十分之几.

例如,米尺,其分度值为  $1\text{ mm}$ ,读数时应估读至十分之几毫米.因为,在生产此类仪器时,所允许实现的最小分度应略大于该仪器的不确定度,一般为  $1\sim 2$  倍.另外,这种规定也容易为正常人眼的分辨能力所接受.此外,实际上它包括了对于那些刻度较密、指针又较粗或被测物与刻度容易造成视差的仪器可读至其分度值的  $1/2$  的规定,但又不排除可以对其估计得更仔细些.

② 对于不确定度与分度值非常接近的仪器,不必进行估读.

例如,各类带有游标(或角游标)的仪器装置,是依靠判断两个刻度中哪条线对齐来进行读数的,这时记下对齐线的数值,不必进行更细的估读.

③ 对于非线性刻度的仪器仪表一般不要求估读.

例如,热电偶真空计的显示压力读数.

④ 对于示值不是连续变化而是以最小步长跳跃变化的仪表,读数时不可能进行估计.

例如,数字显示仪表,只能读出其显示器上显示的数字;当该仪表对某稳定的输入信号表现出不稳定的末位显示时,则表明该仪表的不确定度可能大于末位显示的  $\pm 1$ ,此时可记录一段时间间隔内的平均值.又如,机械停表摆轮的擒纵叉是突变的,无论何时启动或止动停表,由齿轮驱动的指针示值终将与摆轮半周期的整数倍所代表的时间相对应,而且要求设计表盘分度时必须与摆轮的半周期相吻合,所以,对机械停表只能读出其分度值.电动停表的分度值与其交流电源的半周期相对应,因此也只能读出其分度值.

应该指出,掌握上述读数规则十分重要,通过后面的讨论将会发现:仪器、仪表读数的末位即

是读数误差所在的一位,它将直接关系到对测量结果不确定度的估计.

#### 四、物理量的真值

在一定条件下,任何一个物理量的大小都是客观存在的,这个实实在在、不以人的意志为转移的客观量值,称为该物理量的**真值**(记为  $A_0$ ).一般来说,真值仅是一个理想的概念,只有定义严密时通过完善地测量才可能获得.但是,严格完善的测量难以做到,故真值就不能确定.由于真值的不可知性,在长期的实践和科学研究中归纳出以下几种**约定真值**(记为  $A$ ):

- ① 理论真值:如理论设计值,公理值,理论公式计算值.
- ② 计量约定值:国际计量大会规定的各种基本单位值,基本常量值.
- ③ 标准器件值:标准器件相对于低一级或二级的仪表,前者可作为后者的相对标准值.
- ④ 算术平均值:指多次测量的平均结果,当测量次数趋于无穷时,算术平均值趋于真值.

#### 五、测量误差的定义及分类

在测量过程中,我们总希望能准确地测量被测量.由于实验理论的近似性,实验仪器的灵敏度和分辨能力的局限性,实验环境的不稳定性和人的实验技能和判断能力的影响等,使测量值与被测量的真值之间不可避免地存在着差异,我们把这种差异称为**测量误差**.设某物理量的测量值为  $x$ ,则测量误差定义为

$$\delta = x - A_0 \quad (1.1.1)$$

上式所定义的测量误差反映了测量值偏离真值的大小和方向,因此又称  $\delta$  为**绝对误差**.

绝对误差可以表示某一测量结果的优劣,但在比较不同测量结果时则不适用,例如,测量 10.000 m 长相差 1 mm 与测量 1.000 m 长相差 1 mm,两者的绝对误差相同,但明显前者的测量优于后者,这时用**相对误差**(记为  $E$ ),其定义式为

$$E = \frac{\delta}{A_0} \approx \frac{\delta}{x} \quad (1.1.2)$$

就能明显比较出两者测量质量的优劣.

实际上,误差存在于一切科学实验和测量过程的始终.在实验的设计、仪器本身的精度、环境条件及数据处理中都可能存在误差,尽管一般不知道真值,因而也不能计算误差,但能通过分析误差产生的主要原因,减少或基本消除某些误差分量对测量结果的影响.对测量结果中未能消除的误差影响,要估计出它们的极限值或表征误差分布特征的参量,如标准偏差.为此,有必要进一步研究误差的性质、来源和分布特征.

习惯上,根据误差的性质和产生的原因将其分为**系统误差**和**随机误差**.除系统误差和随机误差外,由于实验者使用仪器的方法不正确,粗心大意读错、记错、算错测量数据或实验条件突变等原因造成的明显地歪曲了测量结果的误差称为**粗大误差**.含有粗大误差的测量值称为**坏值**或**异常值**,正确的结果中不应包含有粗大误差.在实验测量中要极力避免过失错误,在数据处理中要尽量剔除坏值.

#### 六、系统误差

在一定条件下,对同一物理量进行多次重复测量中,保持恒定或以可预知方式变化(如递

增、递减、周期性变化等)的测量误差分量,称为系统误差(简称系差,记为 $\delta_s$ ),它具有确定性、规律性、可修正性等特点.根据定义,系统误差为

$$\delta_s = \bar{x}_\infty - A_0 \quad (1.1.3)$$

其中 $\bar{x}_\infty$ 为被测量 $x$ 无穷多次测量结果算术平均值.由于 $A_0$ 的不可知性,以及无穷次测量无法实现,往往采用一个较实用的方法计算系统误差

$$\delta_s = \bar{x}_{\text{多次}} - A \quad (1.1.4)$$

## 1. 系统误差的主要来源

### (1) 仪器误差

这种误差由仪器的制造公差或未按照确定条件使用所致,如天平不严格等臂,米尺刻度不均匀,水银温度计毛细管内径不均匀、分光计读数装置的偏心差、放大器的非线性等,在仪器的规定使用条件内,这种属于仪器缺陷引起的系统误差在使用时可采用适当方法加以修正和消除.

仪器的规定使用条件是指外界影响因素对仪器的计量特性影响不大的一个允许范围.当在规定条件下使用,只引入仪器的基本误差.但如果仪器应有的水平度或垂直度得不到保证,或超出了仪器对温度、湿度、气压等的允许范围,或不按照规定的电源电压及频率供电等,即不按照规定条件使用仪器就会导致新的测量误差(附加误差).

### (2) 理论或方法误差

它是由测量所依据的理论公式近似或实验条件达不到理论公式所规定的要求等引起的.例如,单摆的周期公式成立的条件是摆角趋于零,实际测量时却不能达到,在小角度下也只是一个近似公式,因此利用该公式测定重力加速度,则必定带来测量误差.又如,在测量空气比热容的实验中,要求其放气过程为准静态绝热过程,但实际上却不能实现.再如,用伏安法测电阻时,不考虑电表内阻的影响等.

### (3) 环境误差

它是由于外部环境如温度、湿度、光照等与仪器要求的环境条件不一致而引起的误差.

### (4) 人为误差

它是由实验者本身缺乏经验或生理、心理上的特点所致.例如,用停表计时,总是超前或滞后;对仪器读数时不能正视而总是习惯性偏向一方斜视;用温度计测温时未等温度稳定即开始读数等.

## 2. 系统误差分类

### (1) 按对系统误差的掌控程度可分为已定系差和未定系差:

#### ① 已定系差

指在一定的条件下,采用一定方法,误差取值的变化规律及其符号和绝对值都能确切掌握的系差分量.实验中应尽量消除已定系差,或对测量结果进行修正,得到已修正结果.修正公式为

$$\text{已修正结果} = \text{测量值(或其平均值)} - \text{已定系差} \quad (1.1.5)$$

如采用电流表内接法测量电阻,如果用电压 $U$ 除以电流 $I$ 得到电阻值 $R$ ,会产生大小为 $\delta_{sR}$ 的系差,而用 $R = U/I - \delta_{sR}$ 代替 $R = U/I$ 的简单算法,能基本消除电流表内阻的已定系差影响.预先调整仪表零点等操作能减小测得值的系差.

#### ② 未定系差

指不能确切掌握误差取值的变化规律及其符号和绝对值的系差分量,一般只能估计其限值

或分布特征值.例如,仪表的基本允许误差主要属于未定系差.

(2) 按系统误差表现规律可分为定值系差和变值系差:

### ① 定值系差

这种误差在测量过程中其符号和绝对值恒定不变.例如,千分尺没有零点修正,天平砝码的标称值不准确等.

### ② 变值系差

这种误差在测量过程中呈现规律性变化,有的可能随时间而变,有的可能随位置变化.例如,分光计刻度盘中心与望远镜转轴中心不重合,存在偏心差所造成的读数误差就是一种周期性变化的系差.

## 3. 系统误差的发现及处理

在许多情况下,系统误差常常不明显地表现出来,然而它却是影响测量结果准确度的主要因素,有些系统误差会给实验结果带来严重影响.由系差的特点及其来源不难看出,相同条件下的多次测量方法不能减弱或消除系差,但是它可能帮助人们发现那些由于外界影响因素而导致的系差.改变实验条件进行反复测量,然后根据测量结果和实践经验进行分析,不仅可以发现系差的存在,找到产生这种系差的原因,而且能尽量减弱乃至消除某些系差对测量结果的影响.因此,及时发现系统误差,设法修正、减弱或消除它对实验结果的影响,是实验误差分析的一个重要的内容.

### (1) 系统误差的发现方法

系统误差产生的原因很多,它可以来自各测量要素.因此,要发现系统误差,除应具备系统的理论知识外,还需要丰富的实践经验.认真推敲理论公式推导过程中所要求的条件,仔细分析测量方法或步骤的每一环节,校准测量仪器并检查仪器的使用条件以及全面考虑各物理因素可能对实验带来的影响,是发现系统误差的出发点.现将常用的几种发现系统误差的方法介绍如下:

#### 1) 数据分析法

当随机误差比较小时,将待测量的绝对误差按测量测序排列,观察其变化.若绝对误差不是随机变化而呈规律性变化,如线性增大或减小、周期性变化等,则测量中一定存在系统误差.

#### 2) 理论分析法

一方面,可分析理论公式所要求的条件与实际实验条件的差异.例如,气垫导轨实验中,滑块在导轨上的运动因受到周围空气及气垫层的黏性力的作用会导致速度减小.如果实验中作为无摩擦的理想情况来处理,就会产生与摩擦力有关的系统误差.又如,用单摆测重力加速度时使用的公式  $T=2\pi\sqrt{l/g}$ ,理论要求摆角趋于零,摆球半径也趋于零,且不计空气阻力,而这在实际中均不能保证.另一方面,可分析仪器所要求的使用条件与实际实验条件的差异.例如,测定杨氏模量时要求伸长仪竖直,而实际实验中样品伸长方向可能与重力作用方向之间有一倾角;又如,气压计在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时方可读出准确的气压,而在实际实验时环境温度为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,水银的密度及刻度尺均会发生变化.

#### 3) 实验分析法

① 可用标准仪器或准确度等级较高的仪器进行对比测量,能发现仪器是否存在系统误差.

② 或采用不同方法测量同一物理量,将所有结果进行分析对比,若它们在随机误差允许的范围内不重合,则说明至少有一组测量中存在系统误差,如用单摆法、自由落体法和斜面法同测



当地的重力加速度,用流体静力称衡法、比重瓶法或根据定义式测定同种物质在同一温度下的密度.

③ 或有意识地改变实验参量的数值,可以发现某些系统误差,如改变摆角测周期,可以发现摆角大小对周期的影响,又如选择不同的初、末温,可以发现量热实验中系统与外界的热交换对实验带来的影响等.

④ 也可在其他测量条件完全相同的情况下不同实验人员进行实验对比,发现个人误差.

⑤ 或改变测量位置可以发现仪器结构不对称产生的系统误差,如,改变初始位置进行测量,可发现尺子刻度不均匀而存在的系统误差(称为随机化法);采用左称和右称法可发现天平臂长不等而存在的系统误差(称为复称法);刻度盘转  $180^\circ$  读数可以发现刻度盘偏心而存在的系统误差(称为对径测量法).

## (2) 系统误差的修正和消除

任何实验仪器、理论模型、实验条件,都不可能达到不产生系统误差的程度.由上面分析可知,系统误差产生的原因往往可知或可以掌握,一经查明应设法减弱或消除其影响.可以通过校准仪器,改进实验装置和实验方法或对测量结果进行理论上的修正加以消除或尽可能减小.对未能消除的系统误差,若它的符号和大小是确定的,则可对测量值加以修正.若它的符号和大小都是不确定的,则可设法减小其影响并估计出误差范围.

### 1) 减弱或消除系统误差的影响

常用的降低系统误差影响的测量方法有交换法、替代法、抵消法、线性观测法、随机化方法等.

① 交换法.在测量过程中对某些条件(如被测物的位置)进行交换,使产生系统误差的原因对测量结果起相反的作用,从而抵消某些系统误差.例如,为了消除天平不等臂长而产生的系统误差,可将被测物作交换测量;测定杨氏模量时,在增、减砝码过程中测伸长量的方法;从分光计刻度盘相隔  $180^\circ$  的两处读数取平均来消除偏心差的对径测量方法等.

② 替代法.保持其他测量条件不变,选择一个大小适当的已知量(通常是可调的标准量)替代被测量而不引起测量仪器示值的改变,则被测未知量等于这个已知量.由于在替代的两次测量中,测量仪器的状态和示值都相同,从而消除了测量过程带来的系统误差.例如,在做平衡电桥实验,用已知量替代被测量,使电桥重新达到平衡的测量方法,可消除桥臂带来的系统误差.

③ 抵消法.改变测量中的某些条件进行两次测量,使两次测量中误差的大小相等、符号相反,取其平均值作为测量结果以消除系统误差.

④ 线性观测法.可消除与被测量呈线性关系变化的线性系统误差.具体做法是每隔相等时间轮流测标准量和待测量,若两次测标准量  $b_1$  和  $b_2$  之间待测量  $x$ ,则其平均值  $b = (b_1 + b_2) / 2$  应与待测量  $x$  相对应.在仪器仪表的校准中经常采用线性观测法,这是因为许多系统误差都随时间而变化,且在短时间内均可认为是线性变化,即使按照复杂规律变化的误差,其一级近似也仍为线性误差.另外可用“半周期偶数测量法”消除按周期性变化的变值系统误差.

⑤ 随机化法.这种方法是改变实验条件测量多次,使被怀疑为引起系统误差的原因按随机方式变化,从而使该因素的作用由系统性转变为随机性,由此减少结果的系统误差.例如,我们怀疑米尺刻度不均匀,可以随机地改变起点而测量多次,然后按随机误差的理论处理数据以减小系统误差.