



普通高等教育“十一五”规划教材

国家级物理实验教学示范中心系列教材

# 基础物理实验

周殿清◎主编

张文炳 冯 辉◎副主编



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

普通高等教育“十一五”规划教材  
国家级物理实验教学示范中心系列教材

# 基础物理实验

主 编 周殿清

副主编 张文炳 冯 辉

国防工业出版社

2008

国防工业出版社

北京市海淀区中关村大街27号

100070

http://www.defence.com.cn

电话：(010) 61512114

电邮：dfjpb@163.com

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”规划教材,国家级物理实验教学示范中心系列教材,是在总结武汉大学物理实验教学示范中心近十年实验教学改革成果的基础上编写而成的.全书结构紧凑,实验内容丰富,共编入45个基本实验和55个综合、设计性实验,有许多新颖而富有时代感的实验基础知识.书中对实验方法及其原理的叙述力求繁简共容、深入浅出,以利于学生的自主研究式学习.

本书可作为高等学校理工科物理类及非物理类各专业基础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

基础物理实验/周殿清主编. —北京:科学出版社,2009  
普通高等教育“十一五”规划教材·国家级物理实验教学示范中心系列教材

ISBN 978-7-03-023346-2

I. 基… II. 周… III. 物理学-实验-高等学校-教材 IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 172801 号

责任编辑:昌盛 贾 杨 / 责任校对:赵桂芬  
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2009年1月第一次印刷 印张:28 1/2

印数:1—4 000 字数:628 000

定价:46.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<长虹>)

## 前 言

基础物理实验是高校理、工、农、医等各专业必修的基础实验课程,是为培养学生的创新能力和实践能力、提高学生的科学素质打下坚实基础的极其重要的教学环节。随着时代的发展,特别是近年来随着物理学在其他学科中的迅速渗透和广泛应用,基础实验的内容日益丰富,要求日益提高。为了适应这种变化,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,积极改革实验教学:在课程体系上,打破了力、热、电、光为序排课的旧程式,在基础物理实验中设置三个层次(基本实验、提高型实验、综合与设计性实验),以由低到高分层次递进模式推行基础实验的系统训练;在教学内容上,大力引进新技术、新手段、新成果,开出新实验,使基础实验紧跟时代发展而不断更新;在教学方法上实施“分段开放式”教学,根据三个层次不同的教学要求,由“部分开放”逐步过渡到“全开放”。本教材是总结我们近十年来物理实验教学改革的成果并吸收兄弟院校的成功经验编写而成的。

全书共分为6章,第1章讲述测量误差、不确定度及数据处理的基础知识,所涉及的内容以本课程必须掌握的基本要求为主,个别地方略有扩充。在内容处理上,摒弃了传统误差理论中的一些不科学与不确切的内容,以国际权威组织制定的《测量不确定度表示指南》为标准来阐述不确定度的评定,采用高置信概率(约等于或大于0.95)的扩展不确定度 $U$ 的表现形式,以符合ISO、IEC以及工程技术中广泛应用的情形。第2章到第4章为基本实验(共选编了45个实验),包含了力、热、电、磁、光方面基本的实验内容,可供一、二两个层次教学选择,以加强学生基本实验技能训练,夯实物理实验基础。第5章为综合与应用性实验(共选编了25个实验),其内容涉及相关的综合知识或运用综合的实验方法、实验手段,对学生的知识、能力、素质形成综合的学习与培养。第6章为设计性实验(共选编了30个实验)。这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,为了培养学生自主地进行科学实验而设置的。设计性实验只提出研究对象、要求,给予适当的提示,主要让学生自行确定实验方法、选择合适的仪器设备和设计一定的实验程序,自己加以实现并对结果进行分析处理。这样既保证了基本训练,又提高了物理实验的综合性和实用性,促使学生更积极地完成实验,以利于学生的个性发展和创新能力的培养。

考虑到基础物理实验的独立性和面向低年级学生的特点,对于基本实验,编写时力求将实验原理叙述清楚,计算公式推导完整,使学生在实验预习时掌握理论依据;实验内容与步骤也尽可能具体,以加强对基本实验技能和基本实验方法的训练和指导。一般地说,一个基本实验的课堂实习任务可在3~4学时内完成,部分实验有多个实习内容,教师安排时可进行取舍,也可供学有余地的优秀学生深入研究。对于综合实验和设计性实验,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(如等色谱、吸收谱、液晶相变、光导纤维、液晶光电效应等);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(如计算机应用类实验及传感器特性与应用等);有的只提出课题任务和基本要求,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,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.实验项目的开篇引入了实验的意义及背景知识,以拓展学生的视野和知识面.多数实验后附有预习思考和回答题,前者引导学生预习时注意本实验的物理思想,弄清楚本实验的测量方法要点和值得注意的问题;后者引导学生在实验后进一步分析讨论,巩固和扩大所学知识.

经过几十年的教学实践,作过多次调整、更新和扩充,本实验教材才达到目前的规模 and 水平.这里面凝聚了广大教师和实验技术人员的集体智慧和辛勤劳动.本教材中的多数实验题目包含有许多同志先后的贡献,这里难以逐一记载他们的业绩.除主编外,参加本教材编写的教师主要有张文炳(第2章),冯辉(第3章实验3.13、实验3.14,第5章实验5.5~实验5.11,第6章实验6.10~实验6.21),赵新月(第3章),柯满竹(第5章实验5.1~实验5.4,第6章实验6.1~实验6.8).全书由周殿清统稿.

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;武汉大学教务处、物理科学与技术学院的领导和许多资深教授对本教材的编写给予了极大支持和鼓励;科学出版社的编辑们为本教材的出版作了巨大的贡献.借此表示我们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们批评指正.

编者

2008年9月于武汉大学

# 目 录

## 前言

绪论	1
第1章 测量误差、不确定度及数据处理的基础知识	6
1.1 测量误差的基本知识	6
1.2 直接测量结果不确定度的估算	16
1.3 间接测量结果不确定度的合成	20
1.4 有效数字及其运算规则	24
1.5 实验数据处理的一般方法	29
第2章 力学与热学实验	39
实验 2.1 自由落体运动的研究	39
实验 2.2 气垫导轨上的实验	42
实验 2.3 用三线摆测物体的转动惯量	49
实验 2.4 音叉的受迫振动	54
实验 2.5 玻尔共振实验	57
实验 2.6 用伸长法测钢丝的杨氏模量	65
实验 2.7 声速的测定	70
实验 2.8 用稳态平板法测定不良导体的导热系数	75
实验 2.9 冷却法测量金属的比热容	78
实验 2.10 热电偶温度计的标度	81
实验 2.11 空气密度的测定	84
实验 2.12 液体黏滞系数的测定	90
实验 2.13 测定冰的比熔解热	93
实验 2.14 用拉脱法测液体的表面张力系数	97
实验 2.15 金属线膨胀系数的测量	100
第3章 电磁学实验	103
3.0 电磁学实验基本知识	103
实验 3.1 伏安法测晶体二极管特性	114
实验 3.2 直流电桥测电阻	117
实验 3.3 用补偿法测量电压、电流和电阻	121
实验 3.4 静电场的模拟与描绘	128



实验 3.5	$RLC$ 串联电路的测量与分析	132
实验 3.6	交流电路中功率和功率因数的测量	139
实验 3.7	交流电桥	142
实验 3.8	交流电路的谐振	147
实验 3.9	示波器的原理及应用	154
实验 3.10	$RLC$ 串联电路的稳态特性	161
实验 3.11	$RLC$ 电路的暂态特性	169
实验 3.12	用电磁感应法测交变磁场	178
实验 3.13	铁磁物质磁化特性曲线的测定	182
实验 3.14	用磁聚焦法测电子荷质比	186
实验 3.15	霍尔效应	189
<b>第 4 章</b>	<b>光学实验</b>	197
4.0	光学实验基本知识	197
实验 4.1	薄透镜焦距的测定	206
实验 4.2	透镜组基点的测定	210
实验 4.3	分光计的调节和使用	217
实验 4.4	用阿贝折射仪测定物质的折射率	226
实验 4.5	显微镜	230
实验 4.6	用双棱镜测定光波波长	235
实验 4.7	等厚干涉的应用	240
实验 4.8	迈克耳孙干涉仪	245
实验 4.9	单缝衍射的光强分布及缝宽测定	252
实验 4.10	衍射光栅	254
实验 4.11	光偏振现象的研究	258
实验 4.12	全息照相	263
实验 4.13	阿贝成像原理与空间滤波	269
实验 4.14	超声光栅	274
实验 4.15	光电效应	277
<b>第 5 章</b>	<b>综合与应用性实验</b>	284
实验 5.1	用动态法测定金属的杨氏模量	284
实验 5.2	多普勒效应综合实验	288
实验 5.3	AD590 集成温度传感器性能及应用研究	293
实验 5.4	传感器的原理与应用	294
实验 5.5	非平衡电桥及应用	300

实验 5.6	用示波器测量铁磁材料的磁滞回线	312
实验 5.7	方波电信号的傅里叶分析	314
实验 5.8	用非线性电路研究混沌现象	318
实验 5.9	磁阻传感器和地磁场测量	321
实验 5.10	弗兰克-赫兹实验	325
实验 5.11	密立根油滴实验	328
实验 5.12	法布里-珀罗干涉仪	333
实验 5.13	单色仪及其使用	337
实验 5.14	光源的时间相干性与空间相干性	344
实验 5.15	等色谱及其应用	347
实验 5.16	铈玻璃吸收谱的测定	350
实验 5.17	薄膜厚度的测量	353
实验 5.18	光纤数值孔径和衰减系数的测量	358
实验 5.19	光纤温度传感特性的研究	363
实验 5.20	光纤位移/压力传感特性的研究	366
实验 5.21	像面全息与彩虹全息	369
实验 5.22	全息干涉计量	374
实验 5.23	用光学多道分析器研究氢原子光谱	380
实验 5.24	用偏光显微镜研究液晶的相变及光学特性	384
实验 5.25	液晶电光效应及应用	394
<b>第 6 章</b>	<b>设计性实验</b>	<b>401</b>
6.0	设计性实验概述	401
实验 6.1	易溶于水的颗粒状物质的密度测定	404
实验 6.2	随机误差的正态分布研究	406
实验 6.3	用气垫导轨研究动量守恒与机械能守恒定律	406
实验 6.4	水中声速的测定	409
实验 6.5	落球法测定液体黏滞系数	411
实验 6.6	音叉受迫振动中数据的微机实时采集与处理	413
实验 6.7	智能导热系数测量仪及应用	414
实验 6.8	简易火灾报警器的电路设计与制作	417
实验 6.9	干涉法测量金属的线膨胀系数	418
实验 6.10	测量给定电阻丝的电阻值和电阻率	418
实验 6.11	用自组电位差计测量甲电池的电动势及内阻	419
实验 6.12	PN 结物理特性测定	419



实验 6.13	光敏电阻的特性与光开关的设计	420
实验 6.14	三相电参数的测定	421
实验 6.15	变压器参数及特性测定	421
实验 6.16	电源(电池)的特性研究	422
实验 6.17	霍尔法测磁滞回线	422
实验 6.18	简易万用电表的设计与校准	422
实验 6.19	小功率直流稳压电源的设计与制作	425
实验 6.20	数字电子秤的设计与制作	426
实验 6.21	数字温度计的设计与制作	426
实验 6.22	太阳能电池基本特性测定	427
实验 6.23	温差电现象的研究	427
实验 6.24	内调焦望远镜的组装	428
实验 6.25	光学材料折射率的测定	431
实验 6.26	设计用两种光路测定空气折射率	434
实验 6.27	物质旋光性质的研究	437
实验 6.28	偏振光的定量分析	438
实验 6.29	全息光栅的制作	439
实验 6.30	激光散斑照相法及应用	443
参考文献		446

## 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、新方向的发展,而且导致新的分支学科、交叉学科和新技术学科的产生,推动了化学、生物和医学等各学科向更深层次发展,是这些学科成长和发展的基础和先导;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识观和思维方式,彻底影响了人类社会。

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。物理学在自然科学其他领域、各高新技术领域的广泛应用也离不开实验。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。物理实验在培养学生严谨的科学思维和理论联系实际方面,在训练学生运用实验手段去观察、分析、发现乃至研究、解决问题的能力方面,在提高学生科学实验素质方面,都起着极其重要的作用。因此,学好物理实验对高校理工科学生是十分重要的。

### 一、物理实验课的教学目的

普通物理实验(基础物理实验)课程是高等学校对理工类专业学生进行科学实验基本训练的必修课程,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。普通物理实验课覆盖广泛的学科领域,具有多样化的实验方法和手段,以及综合性很强的基本实验技能训练,它是培养学生创新意识和创新能力、引导学生确立正确科学思想和科学方法、提高学生科学素质的重要基础。本课程的教学,拟在以下三个方面帮助学生学有所成:

(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写出报告);

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、坚忍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

普通物理实验课程是一门实验基础课,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,本课程分为三个层次来进行:第一层次为基础实验,着力培养学生的基本实验技能;第二层次为综合性实验,加强学生物理实验的综合应用训练;第三层次为设计性实验,拓展学生自主研究、自行设计的空间.对于第一、二层次,课程的基本程序分为以下三个主要教学环节:

### 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,要明确哪些物理量是间接测量量,哪些是直接测量量,用什么方法和仪器来测定,在此基础上写出预习报告.预习报告包括:画出实验原理图,列出实验所依据的理论公式,画出数据记录表格.有些实验还要求学生课前自拟实验方案,自己设计线路图或光路图,自拟数据表格等.因此,课前预习的好坏是实验中能否取得成功的关键.

### 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) 认真听取教师对本实验的要求、重点、难点和注意事项的讲解;对照仪器,仔细阅读有关仪器的使用说明和操作注意事项;进一步明确本实验的具体要求.

(2) 仪器(或实验装置)的调节.在力学、热学实验中,一些仪器使用前往往需要调至水平或垂直状态,如杨氏模量仪需调铅直,气垫导轨需调水平等.要注意测量仪器的零点,若某些仪器不能调零,则要记录仪器的零点值.电磁学实验中,在连接电路前,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显重要,它决定着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到要求的使用状态.

(3) 观测.实验中必须仔细观察、积极思维、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、仪器精度等)下,进行认真的、实事求是的观察和测量.要初步学会分析问题,遇到问题时应冷静地分析和处理;仪器发生故障时,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自己的独立工作能力.

(4) 记录.实验数据的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原始记录纸的数据表格内.记录时要用钢笔或圆珠笔,不要用铅笔.如确实记错了,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.切勿先将数据记在草稿纸上,然后再誊写在表格内,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,以及实验现象等。

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,而要在弄懂原理的基础上自己思考着去做;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;应独立自主完成实习而不是依赖他人,否则,将收效甚微。

### 3. 课后小结(撰写实验报告)

在理解实验原理,充分分析实验现象、结果的基础上写出实验报告.实验报告是实验工作的总结,是交流实验经验的材料,要求字体工整,文理通顺,图表规矩,结论明确,以逐步培养以书面形式分析总结科学实验结果的能力。

实验报告内容包括:

**实验名称**

**实验目的**

**实验原理** 用自己的语言对实验所依据的理论做简要叙述,并附有必要的公式和原理图(包括电路图或光路图),不要照抄书本。

**实验内容** 概括地、条理分明地说明实验所进行的主要程序,观察到哪些物理现象,测量了哪些物理量,并说明对这些观测所采用的方法。

**数据处理** 将原始记录数据转记于报告上(原始记录也应附在报告上,以便教师检查),该列表的要列表,该作图的要作图.计算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。

**结果分析** 该部分要明确给出实验结果,并对结果进行分析与讨论(如对实验中观察到的现象、误差的来源进行分析,对实验中存在的问题进行讨论,回答实验思考题或习题等).也可对实验本身的设计思想、实验仪器的改进等提出建设性意见。

实验报告分两次完成,预习报告即实验报告的前半部分(包括实验名称、实验目的、实验原理、实验内容)应在上课前写好,其余部分实验课后完成。

## 三、做好物理实验应注意的几个问题

前面对实验课的三个教学环节——课前预习、课堂操作、课后写出报告提出了明确的要求,这是做好物理实验、养成良好实验习惯的前提.除此之外,还请同学们注意并力求做到下列各点:

### 1. 要注意各类实验的特点

力学、热学实验中要注意仪器装置的水平或铅直调节、量具的零点调节与修正;各个实验中要注意数据处理方法的具体应用。

电磁学实验要按原理线路图正确接线;注意调节仪器到“待测安全状态”,如未合电源前,使电源的输出调节旋钮处于使电压输出为最小值,使电阻箱接入电路的电阻不为零等;注意人身安全,正确地读取各类电表数据是实验成功的关键。

光学实验与上述实验相比,仪器的调节工作更显重要,它决定了实验能否顺利进行和

测量结果是否精确可靠.这是因为在研究或观察某一光学现象(如光的干涉现象)时,首先必须调整仪器或装置的各个部件,使一切有用的光线按照预定的路径和方向进行传播,并遮掉一切无用的光线.在要求测量某些物理量(如波长、折射率等)时,由于这些物理量一般是通过测量长度或角度等几何量来实现的,因此要求进一步调整(如共轴调节、分光计状态调节等),使要测量的各个几何量与仪器系统的机械结构一致(如光具座的刻度尺、分光计的刻度盘).因为只有这样才能保证从仪器中读取的数值就是所要测量的各物理量的数值,从而保证实验结果的可靠性.

## 2. 要明确实验的物理思想

完成一个实验,不单单是为了测得一个实验结果,更重要的是,通过实验进一步明确它的物理思想,学会如何根据其物理思想确定合理的实验方案,正确选择仪器,或者构建新的实验装置.做完一个实验,可以思考一下,这个实验为什么要这样设计,能不能用别的仪器和方法来完成,这对我们做综合、设计和研究性实验尤为重要.

在做基本实验时要做到以下两点:第一,在了解仪器性能的基础上建立清晰的物理图像,这对有效而准确地调好仪器有帮助.(如分光计结构的物理图像,参考教材 P218).第二,明确实验方法的物理内涵.例如,用“自由落体法”和“单摆法”测量重力加速度,哪种方法更优越呢?答案显然是后者.后者将数值很大的下落加速度的测量转变为很小的摆动加速度的测量,从而延缓了所要观察的进程,而且又由于可对周期进行多次重复测量,提高了测量精度.

## 3. 要学会分析实验

(1) 要学会用实验中观察到的现象,分析现象的形成原因,来指导仪器的调节工作.例如,分光计、迈克耳孙干涉仪的调节等.

(2) 学会排除实验过程中出现的故障.

第一,当观察某一物理现象达不到目的时,要检查实验线路是否接好、光路或实验装置是否调好,实验参数的选择是否恰当,如音叉受迫振动实验中,音叉的共振频率选择不当不能产生共振,声速测量实验中超声换能器激励频率选择不当不能形成驻波.

第二,当测量数据不准确时,不要一口咬定“仪器有问题”,造成结果不理想的原因是多方面的,如理解上的偏差、仪器调节不到位、电路接错、看错了现象、数错了数等.此时要通过分析找出原因,并重测一遍.如果确定操作和读数无误,则毛病可能出在仪器上,此时可让指导教师或实验技术人员帮助解决.

(3) 学会分析和评价实验结果.

实验结果的评价,主要靠分析实验本身加以判断.因此,实验时要记录实验条件(包括实验时间、环境温度、气压、所用仪器的编号等)及观察到的实验现象(特别是异常现象),原原本本记录好测量数据,这些资料是分析实验误差的主要依据.有些实验的测量结果还要给出不确定度,不确定度是评价实验结果的科学依据.

测量值存在误差的原因是多方面的,如测量仪器不完善和调节不到位的问题、测量方法问题、测量者的“估读”和“判断”问题等.具体分析实验误差时,要考虑实际上可能对测





## 第 1 章 测量误差、不确定度及数据处理的基础知识

本章从实验教学的角度出发,主要介绍测量误差和不确定度的基本概念、测量不确定度的估算、实验数据处理等方面的基础知识.这些知识不仅在每个物理实验中都要用到,而且对今后从事科学实验也是必须要了解和掌握的.由于这部分内容涉及面较广,深入的讨论需要有丰富的实践经验和较多的数学知识,因此不能指望通过一两次学习就完全掌握.我们要求实验者首先对提到的问题有初步的了解,以后结合具体实验再仔细阅读有关内容,通过实际运用逐步加以掌握.

误差分析、不确定度计算及数据处理贯穿于实验的全过程,它表现在实验前的实验设计与论证,实验进行过程中的控制与监视,实验结束后的数据处理和结果分析.通过本章的学习和今后各个实验中的运用,要求达到:

- (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、完整地表示测量结果.
- (2) 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.
- (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) 掌握列表法、作图法、逐差法和回归法等数据处理方法.

### 1.1 测量误差的基本知识

#### 1.1.1 测量的基本概念与读数规则

物理学分析研究自然界各种现象的方法是:首先观察现象,从中寻找具有大小的要素,然后用这些要素之间的数量关系来表示现象.这些具有大小的要素叫做物理量(或简称量),物理定律一般可用物理量之间的数量关系来表达.物理量的量值一般是由一个数乘以测量单位所表示的特定量的大小,有些量(如力、速度、电场等)除用数值和单位表示其大小(强弱)外,还要考虑其方向.如果是通过实际测量而得的量,还必须标明测量不确定度的大小.即凡是通过实验测得的量(除个别无单位常数外)都必须有数值、单位和测量不确定度,有的还要注明方向.

物理实验中的主要内容之一就是进行观测.所谓“观”,就是认真观察实验中可能出现的各种物理现象,以便认识其规律.所谓“测”,就是定量地测出各物理量的数值.观察往往只能对物理现象作定性的分析,只有通过定量测量,得到各物理量,并找出它们之间的数量关系,才能对各种物理现象有深刻的、规律性的认识.可见,测量在物理实验中占有重要的地位.

## 1. 测量

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预定的标准必须是已知精确的量,并为人们所公认;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。

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。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,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。

物理量的测量有两种基本类型:直接测量和间接测量。

### 1) 直接测量

直接测量就是将待测量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多少倍。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(表 1.1.1),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。例如,米尺测量长度、天平称衡质量、秒表测定时间间隔、温度计测定温度、安培表测定电流、光度计测定光强度等均是直接测量。当人们对某一物理量进行测量时,可根据实际需要和可能,进行单次测量、相同条件下的多次测量或人为改变实验条件反复测量多次。所谓相同条件是指观察者、所用仪器、测量原理和方法及外部环境等宏观条件相同。

表 1.1.1 国际制(SI)基本单位、辅助单位

物理量	单位名称	单位符号	定义
长度	米	m	1m 是光在真空中于 $1/299792458s$ 时间间隔内所经路程的长度
质量	千克	kg	1kg 等于国际千克原器的质量
时间	秒	s	1s 相当于 <sup>123</sup> Cs 原子基态两个超精细能级之间跃迁所对应辐射的 $9.129631770 \times 10^9$ 个周期的持续时间
基本单位	温度 开(尔文)	K	1K 是水三相点热力学温度的 $1/273.16$
电流	安(培)	A	强度相等的恒定电流通过真空中相距 1m 的两根无限长且圆截面可忽略的平行直导线时,若此导线间每米长度上产生的力为 $2 \times 10^{-7}N$ ,则每根导线中的电流为 1A
物质的量	摩(尔)	mol	摩尔是系统的物质的量,该系统中所含的结构粒子(原子、离子、分子等)数与 0.012kg 的 <sup>12</sup> C 所含的原子数相等
光强度	坎(德拉)	cd	坎德拉是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 $1/685(W \cdot sr^{-1})$
辅助单位	平面角 弧度	rad	1rad 是圆内两条半径之间的平面角,这两条半径在圆周上所截弧长与半径相等
	立体角 球面度	sr	球面度是立体角,其顶点位于球心,它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

### 2) 间接测量

对于一些没有提供直接读数仪表的物理量,可以利用它与另外一些可直接测出的物

量之间的函数关系间接求取,这种测量称为间接测量.例如,为测定当地的重力加速度 $g$ ,我们可以采用单摆装置,直接测得单摆的摆长 $l$ 和摆动周期 $T$ ,而用单摆的周期公式求出 $g=4\pi^2l/T^2$ .

应该指出,为了确定实验手段或方法的可行性,为了检验实验仪器或装置的稳定性、重复性,为了判断实验结果的可靠性,为了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,而且需要人为地改变环境条件,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. 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.测量必须读数.因此,为了做好实验、获得可靠的测量数据,除了应该养成良好的读数习惯、尽量减少视差外,采取正确的读数方法是十分重要的.因为仪器的可读度取决于采用模拟显示的仪表和观测者,所以对观测者提出正确的读数要求时,也应区别不同仪器.现分述如下:

(1) 对于一般线性刻度的仪器仪表(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,这是因为,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.

(3) 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.

(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.

### 1.1.2 误差的定义与分类

#### 1. 误差的定义

在一定条件下,任何一个物理量的大小都是客观存在的,都有一个实实在在、不以人