

# 大学物理实验

主 编 彭瑞明

副主编 陈莹梅 吴丽珠 陈慧清

华南理工大学出版社

·广州·

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 彭瑞明主编 .—广州:华南理工大学出版社,2004 9  
ISBN 7-5623-2097-7

.大... 彭... .物理学-实验-高等学校-教材 .O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 050548 号

总 发 行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼,邮编 510640)

发行部电话:020-87113487 87111048(传真)

E-mail:scut202@scut.edu.cn http: www.scutpress.com

责任编辑:欧立局

印 刷 者:广东省农垦总局印刷厂

开 本:787×1092 1/16 印张:21.75 字数:522 千

版 次:2004 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

印 数:1~3100 册

定 价:33.50 元

版权所有 盗版必究

# 前 言

大学物理实验是高等院校理工科学生必修的一门重要基础实验课程,它对培养大学生严谨的科学态度和工作作风、提高实验技能、加深对物理理论的理解都起着十分重要的作用。本书是 2003 年韶关学院教学改革项目“大学物理实验教学改革与实践”的成果之一,是我校从事大学物理实验教学的全体教师和实验技术人员辛勤劳动的结晶,是根据高等院校人才培养的要求结合各校物理实验室的实际情况编写的,是在经多届学生使用的实验讲义的基础上反复修改而成的。

考虑到物理实验是学生进入大学后较早接触的一门实验课程,本书根据先简后繁、先易后难和循序渐进的原则选择编排实验项目,使学生较快地从中学物理实验过渡到大学物理实验。本书打破了传统的力、热、电、磁、光、原子物理独立分块的实验体系,根据学生认知过程和实验能力发展规律,建立了基本实验、综合性实验和设计性实验 3 个层次的新体系;优化了教学内容,精选了基本实验,淘汰了过时的实验;增加了一批综合型、设计创新型实验和反映新知识、新技术的实验,如有关激光、全息、光纤通信等的实验;用 CCD 摄像、计算机等现代实验手段改造了一批传统实验。教学体系层次化、教学内容现代化、教学技术先进化、教学模式开放化、教学目标素质化,是本书的特点和追求的目标。本教材在选择实验内容时注重时代性和先进性。物理实验必须与现代科学技术接轨,才能激发学生的学习积极性与热情,才能使现代科技进步的成果渗透到传统的经典课程内容之中。例如,本书将计算机技术、光纤技术、核磁共振技术、核物理技术、X 射线技术、软 X 射线显微技术、光谱技术、真空技术、传感器技术等现代技术寓于学生实验中,其中不少是各领域的科研新成果。

在传统的物理实验教学中,由于实验仪器复杂、精密、昂贵,老师往往无法对实验仪器的结构、设计思想、运行原理等进行剖析,学生也无法自行设计实验参数、反复调整、观察实验现象、分析实验结果,并且存在实验越先进,现代化技术越高,学生收获反而越少的倾向。本书计算机仿真实验根据人工智能自动控制理论建立物理实验和仪器的模型,实验者可通过运行仿真实验软件,完成实验的各项内容,弥补了上述缺陷。

计算机仿真实验的引进,把物理实验课分成了两个阶段,即仿真实验阶段和真实实验阶段。学生可先通过仿真实验,学习实验的设计思想、实验方法、仪器的设计原理、操作原理与方法,甚至拟定好实验参数、实验计划等,再去完成真实实验,也可以先做真实实验,再做仿真实验,以便加深和提高对真实实验的认识。

本教材配有计算机仿真实验,使用本教材进行教学,无论对学生或教师都有不同于以往的要求:要求学生积极主动地学习,除阅读要做实验的教材或有关参考资料外,还要结合思考题自行设计具体的实验步骤,完成实验。本教材给教师以更大的选择余地和自主发挥创造思维的空间,能更好地体现教师在教学中的主导地位。

本书共有 58 个实验,其中基本实验 27 个,综合性实验 26 个,设计性实验 5 个。第一层次实验主要包括一些基本物理量的测量和物理规律的验证,主要使学生得到基本测量方法及基本实验技能的训练。第二层次实验主要是加深学生对物理理论知识的理解和培养学生对物理知识的综合运用能力,实验的难度和要求有所提高。这两个层次的实验都简明扼要地阐述实验原理,适当介绍实验仪器,比较详细地说明了实验方法,不同的是第一层次实验还给出完整的数据记录表格及具体的误差分析方法,以作示范,第二层次则较为简略。第三层次实验主要培养学生的科研能力和创新能力,这类实验只给出实验的目的、要求和实验原理提示,由学生自己提出和设计实验方案,选择实验仪器,安排实验步骤等,经指导教师审查批准后方可进行实验。这一层次实验要不断在教学过程中提高和丰富。本书也编入了少量难度较大的内容供学有余力的学生进一步提高,以利于因材施教。本书在实验项目的开始扼要介绍了该实验的背景知识及实验意义,大多数实验项目的最后都给出思考题,前者一般与该实验的要领有关,可以促使学生积极思考,准备实验;后者可以帮助学生深入进行总结,加深对实验过程及物理知识的理解。

大学物理实验是一门独立开设的课程,学生往往在还没有学习大学物理理论课的情况下就要进行物理实验,很难在有限的时间内通过预习或自学理解和掌握实验原理、实验方法及仪器的使用。根据我们的实践体会,建议采取两步教学法:先拿出约  $1/3$  学时集中进行实验理论教学,对该环节的实验从实验原理、实验方法及常用仪器的使用等进行系统讲解,为学生预习和实验操作打下理论基础;然后再进行实验操作教学。这样不仅教学效率高,实验效果也好。通过几年的教学实践,我们编入本书的实验内容和实验项目适合普通高校理工科各专业物理实验教程,本书也可以作为教师的参考用书。

本书由彭瑞明主编。陈莹梅、吴丽珠、陈慧清是副主编。参加编写的有彭瑞明、陈莹梅、黄细光、罗凤珍、李芝梅(绪论、测量误差和实验数据处理、有关力热的实验),吴丽珠、许裕华、张德钱、洪运泉(有关电磁学的实验),陈慧清、陈雪花、许海娟、陈国强(有关光学、原子物理的实验)。最后由彭瑞明、黄细光统稿。此外,信息学院物理系主任朱庆欢副教授对本书的编写给予了指导和大力支持。本书的编写和出版得到韶关学院教务处、资产管理处、信息学院、物理系的大力支持,编写过程中参阅了兄弟院校的有关教材,在此一并表示衷心感谢。

教学改革是一项复杂的系统工程,我们所进行的工作只是其中的一部分,还需要不断的完善和改进。书中错漏在所难免,恳请读者指正。

彭瑞明

2004 年 7 月

# 目 录

绪论.....	1
第一章 测量误差和实验数据处理.....	5
1.1 单位和测量 .....	5
1.2 测误差和不确定度 .....	6
1.3 系统误差的修正.....	10
1.4 随机误差的估计.....	11
1.5 直接测量结果的不确定度.....	17
1.6 间接测量结果的不确定度.....	21
1.7 利用不确定度传递与合成关系设计实验.....	23
1.8 有效数字.....	24
1.9 数据处理.....	26
思考与练习 .....	34
第二章 基本实验 .....	36
实验一 长度的测量 .....	36
实验二 物体密度的测量 .....	43
实验三 用单摆测重力加速度实验 .....	47
实验四 杨氏模量的测定 .....	50
实验五 用自由落体仪测定重力加速度 .....	54
实验六 气垫导轨——验证动量守恒定律 .....	58
实验七 扭摆 .....	62
实验八 复 摆 .....	65
实验九 电振音叉与弦振动 .....	68
实验十 声速的测定 .....	70
实验十一 用落球法测定粘滞系数 .....	73
实验十二 线膨胀系数的测定 .....	77
实验十三 混合法测定固体的比热 .....	79
实验十四 液体表面张力系数的测定 .....	81
实验十五 测定冰的熔解热 .....	84
实验十六 精密称衡 .....	88
实验十七 电学仪器认识和使用 .....	92

实验十八	示波器的使用 .....	96
实验十九	分压器、限流器的使用与伏安特性测量电阻 .....	109
实验二十	用电势差计测量电池的电动势及内阻.....	115
实验二十一	万用电表使用.....	119
实验二十二	用电流场模拟静电场.....	125
实验二十三	交流电桥.....	131
实验二十四	惠斯登电桥.....	138
实验二十五	用旋光仪测定糖溶液的浓度.....	144
实验二十六	薄透镜焦距的测定.....	148
实验二十七	偏振光的观察与分析.....	155
第三章	综合性实验.....	165
实验二十八	不良导体导热系数的测定.....	165
实验二十九	刚体转动实验仪测转动惯量.....	168
实验三十	电表的改装与校准.....	173
实验三十一	用双臂电桥测量低电阻.....	178
实验三十二	磁场的描绘.....	185
实验三十三	用冲击电流计测螺线管内轴线上的磁场分布.....	192
实验三十四	铁磁物质动态磁滞回线的测试.....	197
实验三十五	悬丝式灵敏电流计的研究.....	202
实验三十六	用箱式电势差计校准电表.....	210
实验三十七	电子束的聚焦.....	218
实验三十八	RLC 电路的暂态过程研究 .....	224
实验三十九	霍尔效应及磁场的测定.....	232
实验四十	全息照相.....	237
实验四十一	光电效应普朗克常数测定.....	241
实验四十二	用棱镜摄谱仪测定光谱线的波长.....	252
实验四十三	单缝衍射的光强分布.....	256
实验四十四	弗兰克 - 赫兹实验.....	260
实验四十五	用双棱镜测定光波波长.....	264
实验四十六	用透射光栅测定光波波长及光栅的角色散.....	267
实验四十七	迈克尔逊干涉仪的调整与使用.....	271
实验四十八	He - Ne 激光器特性及其参数的测量 .....	277
实验四十九	分光计的调节及棱镜折射率的测定.....	281
实验五十	照相、印相和放大技术 .....	289
实验五十一	等厚干涉——牛顿环.....	294

实验五十二	望远镜、显微镜放大率的测定 .....	298
实验五十三	固体和液体折射率的测定.....	302
第四章	设计性实验.....	306
实验五十四	气垫导轨实验中系统误差的分析与修正.....	306
实验五十五	弹簧振子的研究.....	310
实验五十六	重力加速度的研究.....	311
实验五十七	多量程电表.....	312
实验五十八	测绘伏安特性曲线.....	313
第五章	大学物理仿真实验.....	314
5.1	系统的启动 .....	314
5.2	实验的操作方法 .....	315
5.3	仿真实验操作 .....	315
5.4	实验项目 .....	317
附录	.....	319
附录一	光学实验仪器的使用和维护规则.....	319
附录二	测微目镜.....	320
附录三	照相技术的有关资料.....	321
附录四	CT3 型特斯拉计的使用方法 .....	323
附录五	霍尔效应的副效应及其消除方法.....	325
附表一	中华人中共和国法定计量单位.....	327
附表二	基本物理常量.....	328
附表三	在常温下某些物质相对于空气的光的折射.....	329
附表四	常用光源的谱线波长表(单位 A).....	330
附表五	固体的线胀系数.....	330
附表六	物质的比热容.....	331
附表七	液体表面张力系数.....	331
附表八	物质的密度.....	332
附表九	不同纬度处的重力加速度.....	334
附表十	粘度.....	335
附表十一	一些元素的电阻率及温度系数.....	335
附表十二	几种常用温差电偶的温差电动势.....	336
参考文献	.....	338

# 绪 论

## 1 教学目的

本课程的目的是使学生在中学物理实验的基础上,按照循序渐进的原则,学习物理实验知识、方法和技能,使学生初步了解科学实验的主要过程与基本方法,为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。

## 2 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,学习物理实验知识,加深对物理学原理的理解。

(2)培养并提高学生的科学实验能力,包括:

能够通过阅读实验教材或资料,做好实验前的准备;

能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器;

能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断;

能够正确记录和处理实验数据,绘制曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告;

能够完成简单的具有设计性内容的实验。

(3)培养并提高学生的科学实验素养。培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风、严肃认真的工作态度、主动研究的探索精神,遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德。

物理实验是一门实践性课程。学生在教师指导下,通过独立完成实验课题的过程,增长知识,提高能力。因而上述教学目的达到的水平,在很大程度上取决于学生自己的努力。本课程进行两个学期,每学期单独考核学生的成绩。

## 3 基本程序

物理实验课的基本程序一般分为三个阶段:

(1)课前预习。每次实验课前要做好实验准备工作。通过读实验教材和参考资料,弄清本次实验的目的、原理、所要使用的仪器,明确测量方法,了解实验要求及实验中特别要注意的问题等,在此基础上写出简要的预习报告。预习报告包括实验名称、目的、仪器、简要的原理及计算公式、记录测量数据的表格,以及简单的各种必要

的图,如电路图或光路图。

(2)实验操作。在动手操作前应首先认识和熟悉仪器,了解使用方法,记录仪器的规格型号,然后进行仪器的安装(如接电路)、调试。实验要按步骤井井有条地进行。在正式获取实验数据之前,要把仪器设备调试到最佳工作状态,要明确每步操作的意义,最忌盲目操作。要认真观察现象,正确记录数据。实验中若出现不正常情况应及时请教老师,不要自己随意处理。如果对实验有新的想法或做题外练习,需向指导教师说明并经同意后方可进行。实验完毕,数据应交教师审阅签字,并将仪器整理复原后方能离开实验室。

(3)整理实验报告。做完实验后,应及时处理数据,根据要求写出实验报告。实验报告包括以下内容:

实验名称、日期;

实验目的;

使用的仪器(写明主要仪器的规格、型号和被测试样品的编号);

扼要的原理及公式(电学实验要画电路图,光学实验要画光路图);

简要操作步骤;

列表记录的原始数据及数据处理(包括实验结果准确度的评定和要求绘制的实验曲线图);

必要的讨论(包括回答教师指定的思考题,实验中发现的现象及其解释,对实验装置和方法的改进意见等)。

报告文字力求简练、通顺,数据齐全,图表规范正确。

#### 4.实验者和仪器设备

实验是人使用仪器设备完成的。人是主要的,仪器设备是从属的,要把仪器设备调整到最佳工作状态,才能做出圆满的实验。初学实验的人常常颠倒了实验者和仪器设备的关系,不去认真研究仪器设备的性能、优点、缺点,不善于做各种调整、测试和简单的检修工作,把实验中出现的种种不理想情况一概归咎于仪器设备,这是对自己无能的原谅和掩饰。

使用仪器和实验操作有许多讲究,这些讲究不仅要靠别人教,还要靠自己想。例如使用米尺测量一根两端齐整的铁棒的长度,首先要确保米尺与铁棒平行(为什么?),要使尺的刻度边贴靠铁棒(为什么?),要避免使用尺的端头(为什么?)等。使用电表之前,要了解清楚是什么表,满量程是多少,最小分度是多少,观察表盘上的符号是几级表,正确使用的工作位置是平放还是立放,检查表针偏转是否自如,零点指示是否准确等。使用惠斯登电桥要注意测试它的灵敏度,判断是否需要更换电池。悬丝检流计如果在桌上放不平稳,就应该用些纸片垫平稳了再用。接线柱松动了要用改锥和钳子把它拧紧,导线头掉了要用电烙铁把它焊牢,透镜脏了要把它擦亮,等等。

这些都是实验者该做的事情。不要以为实验室的仪器都是完好无缺的,它是经多人使用过的“旧”仪器,即使新仪器也常会有些小毛病。总之,实验者要善于了解它们,调整维护它们,才能更有效地使用它们,使之发挥出最好的性能。

实验操作中,仪器布局也要讲究。在实验中越是不受外界条件的影响,测试读数才能越迅速准确。在条件允许的前提下,应该尽量把仪器放置得方便。例如把要读数的电表放到便于直视的位置;常要操纵的开关放在左手便于接触到的地方,因为右手多要用来写字;而需要精细调节的仪器则放在右手便于接触到的地方。环境也是影响实验的重要因素,温度、湿度、振动、周围的电场、磁场、光照等都应注意。例如测量很微弱的电流时,如果接线中有的接触点接近暖气或被日光直射就会产生温差电势而影响实验结果。

实验能力的提高是一点一滴积累起来的。其中包含了许多典型观测方法和物理思想,初学实验者必须抱着与高级研究者一样的工作态度去练习,把实验原理和方法彻底弄懂,对每一步操作的意义进行思考,严肃认真地追求尽可能准确的实验结果。只有这样才能加快实验能力的提高。

## 5. 实验记录和报告

做好实验记录是科学实验的一项基本功。在科学研究中,从准备课题、考察分析、实验实施、数据测试、计算推导等过程中会积累大量的原始笔记,这些第一手材料通常称为实验记录。实验记录是科学工作者提出成果、检验成果的重要依据,又是日后进一步研究的基础资料,因而许多严谨的科学工作者对实验记录都十分重视和珍惜。科学实验的记录看起来很平凡,但要做好却并不简单。经常有这样的现象,由于实验过程中有些条件和现象误记、漏记或数据涂改得模棱两可而使难得的实验现象不能重复,重要的实验结果失去价值。

教学实验虽然不是正式的科学研究工作,但是“千里之行,始于足下”。同学们要有培养自己成为严谨的科学工作者的远大志向,从学习期间就养成严格、严密、严肃的作风,高质量做好实验记录。一个好的实验记录可以通俗地归纳为“四懂”,即“自己看得懂,别人看得懂,现在看得懂,将来也看得懂”。具体如何记呢?这里提供一些方法供同学们参考。首先,应该准备一个活页的实验笔记本,记录本应编好页码。在一个实验的起页上,写明实验名称、实验日期、同组人,必要时还应注明天气、室温、大气压、湿度等环境条件,接着要记下实验所用仪器装置的名称、型号、规格、编号和性能情况以及被测样品的号码或者其他标记。在实验记录时,实验原理和操作要领是作为准备实验时的备忘录而记载的,因而应该简明扼要。必要的电路图、光路图、仪器简图等可以徒手画出,以节省时间。事先根据要测试和记录的数据、现象等设计好记录原始数据的表格,并且把表格画大一些,以便于对误测、误记数据进行修改。实验记录应用钢笔(不用铅笔)记录,文字、符号、数码要写清楚,不要让别人或自己以后

辨认时引起疑惑或误解。数据如确有理由需要删改,应该在原数据处做一删掉记号,在旁边重写更改的数据,并应注明更改理由,切忌在原数据上涂改。在实验过程中观察到的现象、出现的问题及排除故障的情况都要随手记录下来。实验记录是从准备实验直到完成实验的全过程的工作记录,应该包括所有检验实验结果时所必须的记载。

实验报告是实验过程和实验结果的正式报导。一份好的实验报告,不仅包括上述实验记录的主要内容,而且应该把原理和实验方法写清楚,特别要在实验结果的表述,数据、图表以及结果的可靠性分析上下功夫。整篇报告应该做到不繁不乱,重点突出,字迹工整,一目了然。

# 第一章 测量误差和实验数据处理

物理实验的任务,一是在实验条件下科学地再现自然现象;二是测量现象中有关物理量以及它们之间的数量变化关系;三是通过测量数据的误差分析和数学处理,科学地评价测得的物理量或物理关系接近于客观现实的程度。所以实验误差分析和实验数据处理是实验工作者必备的知识 and 能力。本章对这方面的知识做入门介绍,如果需要更深入地了解,可参阅有关资料。

## 1.1 单位和测量

### 1.1.1 单位的标准

物理量的大小是由数值和单位结合在一起表示的,因而每个物理量都必须规定出它们的单位:因为各个物理量之间并不是相互独立的,而是由许多物理定义和物理规律联系起来的,所以,只要人们规定了少数几个物理量的单位,其他物理量的单位就可以根据定义或物理规律推导出来。独立定义的单位叫做基本单位,所对应的物理量叫基本量。由基本单位导出的单位叫做导出单位,对应的物理量叫导出量。例如,长度单位为米(m),质量单位为千克(kg),物质密度的单位就可根据定义  $\rho = m/V$  导出为千克/米<sup>3</sup> (kg/m<sup>3</sup>)。

在物理学发展过程中曾建立过各种不同的单位制,这些单位制选取的基本量各不相同,使用中常造成混乱,给学习和工作带来许多不便。1960年国际计量大会正式通过了一种通用的适合一切计量领域的单位制,叫做国际单位制,用英文“SI”表示。SI的7个基本单位定义如下:

长度单位——米(m)。米等于光在真空中(1/299 792 458)s时间间隔内所经路径的长度。

质量单位——千克(kg)。千克等于国际千克原器的质量。

时间单位——秒(s)。秒是铯-133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9 192 631 770个周期的持续时间。

电流单位——安培(A)。在真空中,截面积可忽略的两根相距1m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 1A。

热力学温度单位——开尔文(K)。开尔文是水三相点热力学温度的  $1/273.16$ 。

发光强度单位——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。

物质的量单位——摩尔(mol)。

a. 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 的原子数相等;

b. 在使用摩尔时,基本单元应予指明,可以是原子、分子、离子、电子以及其他粒子,或是这些粒子的特定组合。

除以上 7 个基本单位外,SI 还有两个辅助单位,即平面角以弧度为单位(rad)和立体角以球面度为单位(sr)。有了这几个基本单位,其他物理量的单位就全部可以导出。

我国的法定计量单位,就是以国际单位制为基础制定的。

从以上基本单位的定义可以看出,单位必须与物质世界某种稳定不变的东西联系起来,而且是国际公认的、便于准确复制的,这种对单位的物理记录称之为基准或标准。为了保证单位量值的统一,设立在法国巴黎的国际计量局有保存和复现单位标准的专门实验室,那里的标准称为主标准。每个国家又都有自己的计量组织,保存着定期与主标准校核的副标准,并建立起相应的量值传递系统。任何工厂生产的量具、仪表都要经过计量单位检定才能出售使用,以保证这些量具能在规定的准确度下体现出量度单位。

## 2. 测量

测量是一种比较过程,就是把被测物和体现计量单位的标准量作比较,确定出被测物是计量单位的若干倍。这个倍数值和单位一起表示被测量的值。

测量从形式上又可分为直接测量和间接测量两类。用量具或仪表直接读出测量值的,称为直接测量。然而对于大多数物理量来说,没有直接读数用的仪表或量具,只能用间接的办法进行测量。例如,测量铜柱的密度时,可以直接用尺量出它的直径  $d$  和高度  $h$ ,用天平称出它的质量  $m$ ,则铜柱的密度可通过公式  $\rho = \frac{4m}{d^2 h}$  计算出来。

像这样被测量是由直接测量值再经过物理公式计算得出的,称为间接测量。

## 1.2 测量误差和不确定度

### 1. 测量误差和不确定度概念

人们进行测量,总是希望获得被测量的真实大小,即被测量的客观真值。然而任

何测量都不可能达到绝对准确,各种不确定的误差因素始终伴随在测量过程之中,并使测量结果有一定程度的不确定。这一点已为从事科学实验的人们所公认,因而称之为误差公理。

从广义上,可以把某量值的给出值与其真值之差,定义为该给出值的误差。这里所讲的给出值可以是测量值、实验值、标称值、示值、计算近似值等。于是,测量误差  $x$  可以用下式表示:

$$x = x - X \quad (1-2-1)$$

式中,  $x$  代表测量值;  $X$  代表被测量的真值。由于  $x$  反映的是测量值偏离真值的大小和方向,因此也称之为绝对误差或真误差。

与绝对误差相对应,还可引出一个相对误差的定义,即相对误差

$$E_r = \frac{x}{X} \times 100\% \quad (1-2-2)$$

一般误差都是较小的,而真值一般是未知的,因而计算时分母的真值  $X$  常用测量值  $x$  代替。即:

$$E_r = \frac{x}{x} \times 100\%$$

以上关于测量误差的定义,可以一般地认为:误差愈小,测量值愈准确。但是,误差并不能直接用作测量结果准确程度的量化表示。问题在于被测量的真值正是我们要测量的对象,是未知的,因而不能利用(1-2-1)式计算出测量值的真误差。为了对测量值的准确程度给出一个量化的表述,有必要在测量误差的基础上引入测量不确定度的概念。它表示测量值可能变动(不能确定)的一个范围,或者说以测量结果作为被测量真值的估计值时可能存在误差的范围,并且在这个范围内以一定的概率包含真值。这个范围可以表述为

$$\text{测量结果} = x \pm u(P) \quad (1-2-3)$$

式中,  $x$  是测量值;  $u$  是测量不确定度;  $P$  是包含真值的概率。根据相对误差的定义,也可定义出相对不确定度。

## 2 测量误差的来源

测量过程中的误差因素主要来源于以下几方面:

仪器装置误差。任何量具、标准器、指示仪表等,都有一定的准确度,即限度。也就是说它们的标称值、分度值或指示值在体现计量单位时就有一定的误差范围。一些指零仪器(如天平、检流计、水平仪等)的灵敏程度也是有限度的,在它们表观上指“零”时,告诉我们的信息只是某种变化量已小到它们的灵敏度以下。此外,仪器装置调整(如水平、垂直、平行、准直、零点等)达不到规定的要求,使用时不满足规定的条件等还会引起附加误差。

原理方法误差。例如,用单摆测量重力加速度实验,在直接测摆的周期  $T$  和摆长  $l$  后,可以通过公式  $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$  计算出重力加速度。实际上,该公式在推导中就做了小摆角的近似,同时还做了没有空气阻力、悬线柔软且不伸长的假设。这种由实验原理和方法上的某些近似处理给实验结果带来的误差称为原理方法误差。理论上往往面对的是模型化、理想化的东西,例如理想气体、刚体、无限广延的均匀介质、光滑表面、长直螺线管、简谐振动、平行光线、点光源等等。在应用理论于实际时,一方面要周密考虑实验条件尽量满足理论要求,另一方面也常采取修正理论公式来满足实际情况的办法,以减小这种误差。

环境条件误差。由于各种环境因素(如温度、湿度、气压、震动、电磁场、光照等)不能控制在所要求的状态,或者在空间上有梯度,在时间上有起伏,从而引起测量装置和被测量本身发生变化造成实验误差。

个人误差。由于实验者的生理、心理、习惯以及工作经验和能力等因素引起的误差。例如,用停表计时掐表的反应能力;用卡尺、千分尺测量时掌握测量力的能力;估读仪表最小分度以下值时对单数或双数的偏爱;以及对成像清晰、视场亮暗、声音大小等的判断能力,在测量中表现为观测误差、估读误差、视差等。

被测量本身的起伏变化。由于自然界中一切物质都处于运动变化之中,严格地讲,测量对象的客观值应限定在某一时刻和某一位置(或状态)之下。实际上,许多测量都需要一段时间,特别是多次重复测量。比如,称量质量时,液体蒸发、固体吸潮都会引起测量过程中质量的微小变化;电学测量中电压、电流的不稳定,光度测量中光源发光的不稳定等。怎样定义测量对象呢?这要根据测量的目的去考虑。例如测量一个球体的直径,如果研究的目的是确定这个球圆的程度(椭圆度),就必须规定出空间方位,按确定的方位测量其直径;如果测量的目的是为了求出球的体积,那么最好是从多方位进行测量以求得平均直径,然后以平均直径计算它的体积才更接近球的实际体积。这样就把球的直径随空间方位的微小变化量归并到测量误差中了。

测量仪器对被测量的扰动。例如,测量温度时,要使温度计与被测温物体接触,它们之间必然要进行热交换,测出来的只能是它们平衡后的温度,这个温度与原物体的温度会有一些差异。用电压表测量线路中负载的电压时,电压表的接入会对负载有一个小的分流,负载上的电流将有一小的改变。在研究电场和磁场时,探针或探测线圈的引入会改变原电场或磁场的分布。因而在实验设计时,应该仔细考虑这种扰动的影响。好的测量仪器一般都把这种扰动影响减小到仪器误差以下。

以上几方面的误差来源可以作为分析实验误差的思路。在实际工作中,常常只有一两个影响较大的因素需要仔细考虑,而其他影响较小的因素可以忽略。

### 3. 误差的分类

从研究和处理误差的需要出发,根据误差的表现形式,可将误差分为系统误差和

随机误差两类。

系统误差。系统误差的特征是,在同一条件下多次测量同一量时,误差的绝对值和方向保持恒定,或在条件改变时,误差的绝对值和方向按一定规律变化。例如,计时的停表走快或走慢,水银温度计零刻度偏离冰点,钢尺的受热膨胀,原理方法上的某些近似,以及观测者生理和心理上的偏向等。原则上讲,这类误差能够针对产生的原因进行消除或修正。但是在实际工作中,有时因为知识的不足,或者不需要花费更高的代价和时间去深入追究所有的系统误差。于是从对系统误差掌握的程度,又可分为已定系统误差和未定系统误差两种。对已定系统误差,即产生原因、大小、正负都已知的误差,可以找出修正值对测量结果加以修正。对未定系统误差可以通过改进测量方法进行消减,或者凭经验估计出它们可能产生的大小范围,而纳入到测量结果的不确定度中。

随机误差。随机误差的特征是,在同一条件下多次重复测量同一个量时,每次出现的误差大小、正负没有确定的规律,以不可预知的方式变化着。这种误差多数情况是由于对测量值影响微小的、相互独立的多种变化因素造成的综合结果。例如,各种实验条件在控制范围内的波动使测量仪器和测量对象产生微小的起伏变化,重复测量时实验者每次操作在对准、估读、判断、辨认上产生的微小差异等。由于随机误差在多次测量中,有时正时负、时大时小的特点,因而通过对多次测量值取平均,可以抵消掉部分影响。在多次重复测量取得大量数据后,虽然每一个数据中所含随机误差是不可预知的,但大量数据中所含随机误差是按一定统计规律分布的,可以用统计方法计算出它的散布范围,纳入到测量结果的不确定度中。

误差的相互转化。系统误差和随机误差在一定条件下是可以相互转化的。例如,一支米尺刻度不均匀,如果固定以尺的端面测量某一物体长度时,测量结果会产生一系统误差,若采用尺的不同刻度部分来多次测量则可把分度不均匀的误差随机化。又如,工厂成批生产的电阻对标称值的允许起伏变化是随机的,但对于某一个固定的电阻,它所引起的误差又是固定的。一个具体测量中出现的误差往往既含有随机误差,又含有系统误差。在实验中,当实验条件稳定且系统误差可以掌握时,就应尽量保持在相同条件下做实验,以便修正系统误差;当系统误差未能掌握时,常常要想出一些办法使系统误差随机化,以便在多次测量取平均后抵消其一部分。

以上所说的误差并不包括错误,如读错数、记错数、对错位置等。这种因粗心大意造成的错误,实验者是必须避免的。

习惯上常用“精密度”这个词来反映随机误差的大小程度;用“正确度”反映系统误差的大小程度;用“准确度”反映它们的综合影响。当我们说测量准确度高时,既有测量结果偏离真值小的含意,又有在同样实验条件下多次测量重复性好的含意。“准确度”有时也简称为“精度”。这些词在不同领域、不同书中使用时,其含意不尽统一,同学们应当注意。

## 1.3 系统误差的修正

在实验工作中发现和消减系统误差相对来说是一件较难的工作。它既需要理论指导又需要丰富的实验工作经验,往往是针对实际工作情况采取灵活多样的办法去解决。以下介绍的是常用的一些方法。

### 1. 如何发现系统误差

要发现系统误差,就必须仔细研究测量理论和方法的每一步推导,检验或核准每一件仪器,分析实验理论和仪器所要求各种实验条件是否能满足,考虑每一步调整和测量中各种因素对实验的影响情况等。下面简述几种常用的方法。

实验对比法。包括实验方法的对比,即用不同方法测同一个量,看结果是否一致;仪器的对比,如用两个电流表接入同一电路对比;改变测量步骤对比,如测某物理量与温度的关系可用升温测量与降温测量看读数点是否一致;改变实验中某些参量的数值;改变实验条件以及换人测量等方法进行对比。在对比中如果发现实验结果有差异,即说明实验中存在系统误差。

理论分析法。包括分析实验所依据的理论公式要求的条件与实际情况有无差异,分析仪器所要求的使用条件是否达到等等。

分析数据法。这种方法的理论依据是随机误差服从一定统计分布规律,如果结果不遵从这种规律,则说明存在系统误差。在相同的条件下得到大量数据时,可用这种方法。

如按测量次序记录的测量数据的偏差是单向或周期性变化,说明存在固定的或变化的系统误差,因为按照偶然误差的统计分布理论,测量值的散布在时间和空间上均应是随机的。

以上只是从普遍的意义介绍了几种发现系统误差的途径,实际工作中,还会有许多具体办法。

### 2. 系统误差的修正和消减

能掌握的系统误差,可以通过引入修正值加以修正。例如对千分尺的零点修正,利用较高级的电表对低级的电表测出修正曲线等。但实际中,有时不易找出确切的系统误差值,则常在测量中设法抵消它的影响。下面介绍几种典型的从测量方法上抵消系统误差的方法。

替换法。在测量装置上对待测量进行测量后,立即用一个标准量替换待测量,再次进行测量,并调到同样的情况,从而得出待测量等于标准量。例如:用电桥测量电阻时,调平衡后,把被测电阻用可变标准电阻替换,调标准电阻值使电桥再达到平