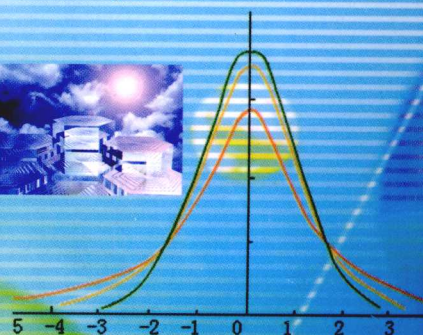
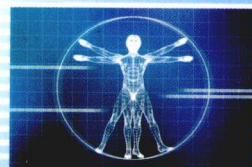


全国高等医药院校规划教材

物理学实验

丘翠环 主编



科学出版社

www.sciencep.com

全国高等院校物理实验教材系列

物理学实验

王平康 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

全国高等医药院校规划教材

物理学实验

主 编 丘翠环

副主编 许静芬 陈 曙

编 者 (以姓氏笔画排序)

王 铭 叶红玲 丘翠环

朱贵文 许静芬 孙宝良

杨永霞 吴怀选 张 薇

陈 曙 黄耀庭

科 学 出 版 社

北 京

· 版权所有 侵权必究 ·

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303(打假办)

内 容 简 介

本书是根据医药院校学生的知识结构特点,结合作者多年的物理实验教学经验编写而成的。本书较为系统地介绍了测量误差和数据处理的方法、物理实验的基本方法和基本操作技术,为学生进行实验和处理数据提供必要的基础知识。在实验内容和项目的选取上力求贴近医药类专业的知识结构,既考虑到物理学本身,又兼顾医药学专业特点。实验中既有保证基本物理实验技能训练的基础实验,又有提高的综合性和设计性实验。

本书可供高等医药院校本、专科师生使用,各校可根据学时、专业的不同选择其中部分实验。

图书在版编目(CIP)数据

物理学实验 / 丘翠环主编. —北京:科学出版社,2009

全国高等医药院校规划教材

ISBN 978-7-03-025464-1

I. 物… II. 丘… III. 医学物理学-实验-医学院校-教材 IV. R312-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 153290 号

策划编辑:周万源 李国红 / 责任编辑:周万源 李国红 / 责任校对:陈玉凤
责任印制:刘士平 / 封面设计:黄 超

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

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>

北京市农林科学院有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009 年 8 月第一次印刷 印张:12 1/2

印数:1—5 000 字数:295 000

定价:25.00 元

如有印装质量问题,我社负责调换

前 言

本书是作者根据多年的医药院校物理实验教学中的一些体会和经验,在我们使用多年的物理实验教学讲义基础上修改、补充而成的。

全书共分4章。第1章为物理实验的基本知识,比较系统地介绍了测量误差和数据处理的方法(包括常用数据处理软件)、物理实验的基本测量方法和基本调整操作技术。此章内容在本课程中占有重要的地位,它是学生进行实验和处理数据的基础。第2章为基础实验,主要包括一些基本物理量的测量、基本实验仪器的使用。此章内容是复杂测量的基础,在日后的实验和工作中经常会用到,对培养学生具有一定的实验技能和基本的科学素养非常重要。第3章为综合性实验,实验项目综合应用本课程的基本知识与技能,着重提高学生综合实验的能力以及分析问题、解决问题的能力。第4章为设计性实验,实验项目以基本知识、基本方法、基本技能的灵活运用为目的,使学生进一步深入理解物理实验的设计思想和实验方法,了解物理实验技术应用,有利于激发学生学习的主动性和积极性,培养学生的实践能力和创新意识。

基于医药院校的物理实验仪器设备及对学生的培养目标与理工科院校的不同,本书在实验内容的选取上力求贴近医药专业的相关知识,在难度和深度上力求与医药院校学生的知识结构相适应,在实验项目的选题上力求题目典型、内容丰富,以使学生在有限的学时内较快地提高实验技能。为了便于学生学习和教师教学,我们编写时努力做到:实验目的明确,实验原理叙述清楚,实验内容安排得当,实验步骤详略得当。在每个实验后面都列有思考题,以便学生预习和进行实验分析。

实验教学是一项集体事业,无论是实验教材的编写,还是实验项目的开设准备,都凝聚着我们全体教师和技术人员的智慧和劳动成果。同时,在编写本书的过程中,我们广泛参阅了兄弟院校的有关教材,吸收了其中富有启发性的观点和优秀内容,在此表示衷心的感谢。

本书由丘翠环主编,教材编写分工如下:丘翠环负责统稿工作及编写绪论、第1章、实验2-1、实验2-2、实验4-2;张薇负责编写实验2-3、实验2-17、实验4-1;朱贵文负责编写第1章的附录和实验2-4;许静芬负责编写实验2-5、实验2-12、实验2-16;吴怀选负责编写实验2-6、实验3-4;叶红玲负责编写实验2-7、实验2-9;陈曙负责编写实验2-8、实验3-1、实验3-2、实验4-4;黄耀庭负责编写实验2-10、实验4-5;王铭负责编写实验2-11、实验3-3、实验3-5、实验4-3;孙宝良负责编写实验2-13、实验2-18;杨永霞负责编写实验2-14、实验2-15;张磊同志协助绘制部分插图。

本书在编写过程中得到了各级主管部门的关心和许多同志的热情帮助,在此谨致以衷心的感谢。限于编者的学识和水平,书中难免有错误和不足之处,恳请使用本书的教师、同学和其他读者提出宝贵意见,以便今后改进。

编者

2009年5月

• i •

目 录

前言

绪论	(1)
----------	-----

第 1 章 物理实验的基本知识	(6)
-----------------------	-----

第 1 节 物理量的测量	(6)
--------------------	-----

第 2 节 测量误差	(7)
------------------	-----

第 3 节 有效数字及其运算法则	(12)
------------------------	------

第 4 节 直接测量的真值和测量误差估算	(15)
----------------------------	------

第 5 节 测量结果的表达	(17)
---------------------	------

第 6 节 间接测量的真值和测量误差估算	(20)
----------------------------	------

第 7 节 常用的数据处理方法	(25)
-----------------------	------

第 8 节 物理实验的基本测量方法	(29)
-------------------------	------

第 9 节 物理实验的基本调整操作技术	(32)
---------------------------	------

第 2 章 基础实验	(44)
------------------	------

实验 2-1 长度的测量	(44)
--------------------	------

实验 2-2 液体黏滞系数的测定	(53)
------------------------	------

实验 2-3 用拉脱法测液体表面张力系数	(58)
----------------------------	------

实验 2-4 用流体静力称衡法测固体和液体的密度	(62)
--------------------------------	------

实验 2-5 万用电表的使用	(66)
----------------------	------

实验 2-6 伏安法测量电阻	(73)
----------------------	------

实验 2-7 用惠斯登电桥测电阻	(76)
------------------------	------

实验 2-8 用电势差计测电池电动势	(80)
--------------------------	------

实验 2-9 单踪示波器的使用	(85)
-----------------------	------

实验 2-10 双踪示波器的应用	(96)
------------------------	------

实验 2-11 空气中声速的测定	(103)
------------------------	-------

实验 2-12 用双棱镜干涉测量光波的波长	(105)
-----------------------------	-------

实验 2-13 用牛顿环测透镜曲率半径	(112)
---------------------------	-------

实验 2-14 分光计的调节与使用	(116)
-------------------------	-------

实验 2-15 用透射光栅测光波波长	(124)
--------------------------	-------

实验 2-16 用旋光仪测糖溶液浓度	(127)
--------------------------	-------

实验 2-17 用分光光度法测绘溶液的吸收曲线	(134)
-------------------------------	-------

实验 2-18 用阿贝折射仪测液体折射率	(139)
----------------------------	-------

第 3 章 综合性实验	(144)
-------------------	-------

实验 3-1 密立根油滴实验	(144)
----------------------	-------

实验 3-2 用光电效应测普朗克常量	(148)
--------------------------	-------

实验 3-3 磁共振	(152)
实验 3-4 用光学多道分析器研究氢原子光谱	(156)
实验 3-5 光学综合实验	(162)
第 4 章 设计性实验	(167)
实验 4-1 用落球法测甘油的黏滞系数	(168)
实验 4-2 电炉丝电阻率的测定	(170)
实验 4-3 用热敏电阻改装温度计	(171)
实验 4-4 多用电表的改装和校准	(173)
实验 4-5 DT830B 数字万用表的安装与调试	(179)
参考文献	(187)
总附录	(188)

绪 论

一、物理实验课的重要性

物理学是一门建立在实验基础上的科学。物理实验在物理学的发展过程中一直起着重要和直接的推动作用,物理概念的建立、物理规律的发现、物理理论的形成,都必须以严格的物理实验为依据。物理实验是物理学的基础,也是物理学研究的基本方法。

物理实验的理论、方法、技术是所有实验中最基本、最普遍的,是其他实验的基础。物理实验也为其他学科的发展提供了有利的方法和工具,现代高科技的发展,其设计思想、方法和技术也来源于物理实验。因此,对于医药院校的大学生来说,不管所学专业如何,学习物理实验方法和实验技能训练是必不可少的,也是素质教育的重要环节。它在培养学生运用实验手段观察、发现、分析、研究和解决问题,提高动手能力和科学实验素养等方面起着重要的作用,同时也为学生今后的学习和工作奠定良好的基础。

二、物理实验课的要求

物理实验课是一门实践课程。学生在教师指导下独立完成实验课题,将得到系统的实验方法和实验技能训练,达到增长知识、提高能力的目的,从而有助于培养学生严谨的工作作风、科学的思维方法和严肃认真的工作态度,使学生具有良好的科学素养。具体要求是:

1. 使学生受到基本实验方法和实验技能的训练 物理实验中所选择的实验项目,集中了许多科学实验的训练内容,其中包含许多具有普遍意义的实验知识、实验方法和实验技能。只有通过实践,才能真正体会和掌握实验的基本知识和基本方法,提高实验技能。

2. 培养和提高学生的科学实验能力 通过对实验现象的观察、分析和物理量的测量,掌握各种实验仪器的调整和使用,熟悉基本的测量方法和技术,正确记录和处理实验数据,科学分析实验结果,撰写完整的实验报告。

3. 培养和提高学生的科学实验素养 实验不能只是测量几个数据,要充分利用实践机会培养动手能力。要学会在遇到困难和不理想的情况时,通过对观察到的现象认真分析,找出原因动手解决问题。养成善于动手、乐于动手的良好科学习惯,理论与实践相结合的科学态度,认真仔细、一丝不苟、实事求是的科学作风,通过实践使学生的科学实验素养得到提高。这对于从事任何一项工作都是十分有益的。

三、物理实验课的特点

实验课与理论课不同,它的特点是同学们在教师的指导下自己动手独立地完成实验任务。因此,在物理实验过程中,同学们应关注以下几点:

1. 实验的物理思想 对于每一个物理实验,不仅应重视其原理、实验装置和数据处理

方法等问题,更应着重了解其物理思想,这对于我们设计新的实验往往能提供很多启示和可借鉴之处。

2. 实验装置与仪器 使用仪器或装置必须要了解它的原理和使用方法、正常的使用状态和环境条件,这样才能充分发挥仪器或装置的性能。为此,要了解什么是正常使用状态,怎样判断它是否达到正常使用状态,是我们能够取得客观真实数据的前提,如使用天平、电势差计、分光计等仪器测量前必须进行调节才能进行正常使用。

实验后不要马上拆散或复原仪器、装置,要对记录的数据做初步分析,在不需要补测数据时才可将仪器装置恢复到使用前的状态,这是保护仪器的必要条件。

3. 及时发现问题 由于某些原因实验中出现问题也是常见的,如理解上的偏差、仪器调节不到位、线路接错、参量取值不当、看错了现象、读错了数据、实验装置变动等。因此实验时要养成要边观察现象、边审查数据、边思考分析的习惯,看看是否有不正常的现象或数据,及时发现问题进行处理。如果不假思索地埋头测量,那就可能在实验结束后才发现数据不对,造成精力和物资的浪费。

四、物理实验课的教学环节

物理实验是学生在教师的指导下独立进行的一种实践活动,每个实验的教学环节包括实验预习、实验操作和实验结果的整理 3 部分。

1. 实验前预习 认真阅读教材,明确实验的目的、测量要求和测量方法,理解实验原理,了解实验仪器的构造原理、使用方法,熟悉实验步骤,弄清注意事项。

在此基础上,写出实验预习报告,内容包括实验题目、实验目的、实验器材、实验原理(即实验报告具体内容的第 1~4 项)以及完成预习思考题和准备一张画好记录实验原始数据表格的记录纸(即实验报告具体内容的第 7~8 项)。上课时要将预习报告交给指导教师检查签名,并随时准备老师的提问。

2. 实验操作 实验时必须严格遵守实验室规章制度,按照具体实验的操作步骤和注意事项进行实验。对于基础实验和综合性实验,在听取教师的讲解和要求后,先熟悉仪器的用法和性能,正确调整仪器,使仪器处于良好的工作状态;再通过初测,熟悉测量过程、范围和粗略的变化规律,然后才进行正式测量。对于设计性实验,必须先将已设计好的实验方案与教师讨论经同意后方可进行实验。

实验时必须如实将测量数据清楚整齐地记录在预习时准备好的原始数据记录表格中,记录数据时要特别注意单位和有效数字,不要用铅笔记录数据。要严肃对待测量数据,数据一经记录,就不可随意涂改。对那些有明确理由认为是错误的数据,确要修改时,可在原数据上画一删除线(不要涂掉),然后在旁边记上更改的数据,再说明原因。

多人合做实验时,应分工协作,各司其职,互相配合。实验完毕,应将实验记录的原始数据交给指导教师检查,实验合格者予以签字通过,否则要重测或补测,最后再将仪器整理好。

实验操作是实验教学环节的核心,是学生主动研究、积极探索的实践活动,每个实验收获的大小取决于学生主观能动性的发挥程度。

3. 实验结果的整理 实验后,要及时整理和处理实验数据,对观测到的数据进行分析和计算是实验的重要环节。要求先将文字公式化简,再代入数值进行计算,在计算过程中

应遵从测量误差和有效数字运算法则对数据进行取舍,并将结果填入数据表中,简明、完整、真实地表达出实验结果;对要求作图的实验应按图解法的要求绘制图线;对实验中出现的問題应进行分析和讨论。最后在规定时间内写出完整的实验报告。

五、如何写实验报告

实验报告是实验者的实验工作总结,是实验课的学习轨迹,是报告实验结果的文字报道。它不仅是供教师评定成绩的资料,还是日后可供参考的资料。因此,实验报告不仅要対实验过程和结果有分析和评价,还要有自己的思考。撰写完整实验报告是实验课学习的重要组成部分,也是培养实验能力的一个训练。

实验报告要求独立完成,不允许相互抄袭或篡改数据、拼凑实验结果。实验报告要求文字通顺,用语确切,字迹清晰,数据完整,图表规范,结果正确,分析与讨论认真、到位。实验报告可以在原预习报告的基础上完成,具体内容包括:

- (1) 实验题目、实验时间、实验完成人及协助者(姓名、班别)。
- (2) 实验目的:完成本实验应达到的基本要求。
- (3) 实验器材:所用仪器、用具的名称、规格和编号,便于复查(规格和编号在实验室填写)。
- (4) 实验原理:简述原理,包括简单的公式推导、原理图或电路图。
- (5) 数据记录及处理:有记录数据的表格、必要的计算过程、实验曲线(必须用坐标纸做图),写出结果的标准形式和误差或不确定度。
- (6) 讨论与分析:分析总结实验得失,正确评估实验结果的可信度,分析引起实验误差的主要原因,对实验中观察到的异常现象进行解释,写出实验后的感悟和对改进实验的建议。
- (7) 思考题:包括课前预习思考题和课后思考题。
- (8) 原始数据(要有指导教师签字)。

注:实验报告是评判实验成绩的重要依据之一,要求统一用实验报告纸书写,内容完整,按顺序装订。

六、物理实验室规则

实验室是教学的重要场所,为了保证实验教学的正常进行,培养学生严肃认真的工作作风和爱护公物的品德,进入实验室的学生,必须严格遵守实验室的各项规章制度。

- (1) 学生必须按时进入实验室,不得迟到、早退。实验时间如需变动,需经实验室批准。
- (2) 进入实验室要保持安静,不得高声谈笑,不准动用与本实验无关的仪器设备和室内其他设施。
- (3) 学生在每次实验前要认真预习,了解实验目的、实验要求、实验内容、实验仪器及注意事项,并接受教师的检查。
- (4) 准备工作就绪后,须经指导教师同意,方可动用仪器设备,进行实验。
- (5) 实验中要爱护实验室内的仪器、设备和设施,严格遵守操作规程,不能毛手毛脚,在不明白仪器的操作方法时,切勿随意动手。高值及精密仪器须填写使用情况登记表。

(6) 实验时不得擅自调换仪器,如遇仪器故障、损坏仪器、丢失零配件等应及时向指导教师报告,并按实验室的有关规定办理登记或赔偿手续。

(7) 实验中要注意安全,如出现事故,要保持镇静,及时采取措施(如断水、断电),防止事故扩大。对不遵守操作规程又不听劝告者,指导教师有权令其停止实验,取消其实验成绩。对违章操作造成事故,要追究责任。

(8) 实验室一切物品不得带离实验室,违者除追回物品外,要批评教育或纪律处分。丢失、损坏要赔偿,情节严重者上报学校处理。

(9) 实验完毕,经指导教师审阅实验数据,检查实验仪器、设备无误并签字认可后,关闭电源、水源,整理好仪器设备方可离开实验室,并由值日生做好实验室卫生清洁工作。

(10) 学生要求重做实验或做规定外的实验,应征得指导教师同意后,方可进行实验,以免发生事故。

附录 实验报告(示例)

实验报告要写在学校印制的专用实验报告纸上,本报告仅供参考。

实验名称: 实验一 长度的基本测量

班级

姓名 学号

日期

一、实验目的

二、实验器材

游标卡尺(编号 11),螺旋测微计(编号 5),读数显微镜(编号 2),空心圆柱体(编号 1),小钢球(编号 3),玻璃毛细管(编号 1)。

注:记下实验仪器和测量物体的编号,目的是为了便于核对数据和复查。实验器材在实验中往往会发生一些不易察觉的问题,实验后在数据处理时便会暴露出来。记下实验器材等编号,便于找回复核,找出问题产生的原因。

三、实验原理

注:对实验原理和使用的实验仪器做简要叙述,如有必要,可用图配合说明。对实验中所用的计算公式要写出,并用文字说明它表示什么物理量、单位以及采用本公式时的实验条件等。

四、预习思考题

五、数据记录和处理(以测量空心圆柱体的体积为例)

仪器误差: 0.002cm ; 零点读数: $D_0 = H_0 = d_0 = h_0 = 0.000\text{cm}$ 。

注:下表中的 D' 、 H' 、 d' 、 h' 分别为各项直接测量的读数值。

单位:cm

测量次数	外径 $D(\text{cm})$ $D=D'-D_0$	柱高 $H(\text{cm})$ $H=H'-H_0$	内径 $d(\text{cm})$ $d=d'-d_0$	筒深 $h(\text{cm})$ $h=h'-h_0$
1	4.002	4.002	2.502	2.000
2	4.000	4.000	2.500	2.002
3	3.998	3.998	2.498	1.998
4	4.002	4.002	2.500	2.000
5	4.002	4.002	2.502	2.002
6	4.000	4.000	2.504	2.004
平均值	4.001	4.001	2.501	2.001
A类不确定度 u_A	0.0007	0.0007	0.0009	0.0009
B类不确定度 u_B	0.002	0.002	0.002	0.002
各量的总不确定度 u	0.002	0.002	0.002	0.002
测量结果表示	4.001 ± 0.002	4.001 ± 0.002	2.501 ± 0.002	2.001 ± 0.002

圆柱体的体积

$$\bar{V} = \frac{\pi}{4} (\bar{D}^2 \bar{H} - \bar{d}^2 \bar{h}) = \frac{\pi}{4} (4.001^2 \times 4.001 - 2.501^2 \times 2.001) = 40.46 \text{cm}^3$$

相对不确定度

$$U_r = \frac{u_v}{\bar{V}} = \sqrt{\left(\frac{2\bar{D}\bar{H}}{\bar{D}^2\bar{H}-\bar{d}^2\bar{h}}u_D\right)^2 + \left(\frac{\bar{D}^2}{\bar{D}^2\bar{H}-\bar{d}^2\bar{h}}u_H\right)^2 + \left(-\frac{2\bar{d}\bar{h}}{\bar{D}^2\bar{H}-\bar{d}^2\bar{h}}u_d\right)^2 + \left(-\frac{\bar{d}^2}{\bar{D}^2\bar{H}-\bar{d}^2\bar{h}}u_h\right)^2}$$

$$= \frac{u}{\bar{D}^2\bar{H}-\bar{d}^2\bar{h}} \sqrt{(2\bar{D}\bar{H})^2 + (\bar{D}^2)^2 + (2\bar{d}\bar{h})^2 + (\bar{d}^2)^2} \quad (\text{此处 } u = u_D = u_H = u_d = u_h)$$

$$= \frac{0.002}{4.001^2 \times 4.001 - 2.501^2 \times 2.001} \sqrt{(2 \times 4.001 \times 4.001)^2 + 4.001^4 + (2 \times 2.501 \times 2.001)^2 + 2.501^4}$$

$$= 0.2\%$$

总不确定度

$$u_v = \bar{V} \cdot U_r = 40.46 \times 0.2\% = 0.09 \text{cm}^3$$

用不确定度表示圆柱体的体积

$$V = \bar{V} \pm u_v = 40.46 \pm 0.09 \text{cm}^3$$

六、讨论与分析

七、课后思考题

原始数据:圆柱体体积的测量。

仪器误差:0.002cm;零点读数: $D_0=H_0=d_0=h_0=0.000\text{cm}$ 。注:下表中的 D' 、 H' 、 d' 、 h' 分别为各项直接测量的读数值。

单位:cm

测量次数	外径 $D(\text{cm})$ $D=D'-D_0$	柱高 $H(\text{cm})$ $H=H'-H_0$	内径 $d(\text{cm})$ $d=d'-d_0$	筒深 $h(\text{cm})$ $h=h'-h_0$
1	4.002	4.002	2.502	2.000
2	4.000	4.000	2.500	2.002
3	3.998	3.998	2.498	1.998
4	4.002	4.002	2.500	2.000
5	4.002	4.002	2.502	2.002
6	4.000	4.000	2.504	2.004

第1章 物理实验的基本知识

物理实验是用实验的方法研究各种物理规律,包括定性分析与定量研究两个层面。定性分析是定量研究的基础,测量是定量研究的重要环节。物理实验不仅要定性观察、分析各种物理现象,而且更重要的是通过测量找出各相关物理量之间的定量关系——规律。由于测量仪器、测量方法、测量环境、测量者观察力等因素的局限,测量不可能绝对准确。因此,我们必须了解误差的概念、特性、产生的原因及测量结果的不确定度与估算方法等有关知识,对测量结果的可靠性做出评价,对其误差范围做出估算;通过对基本测量方法和调整技术的了解,尽量消除或减小由此而带来的误差。

由于误差理论和数据处理涉及的数学知识较多和较深,本章仅讨论初步的误差理论和数据处理方法。

第1节 物理量的测量

一、测量与单位

物理实验是以测量为基础的。在研究物理现象、了解物理特性、验证物理原理、发现实验规律时都要进行测量。物理量的测量,就是借助仪器和工具,将待测量与规定作为标准计量单位的同类物理量进行比较。显然,所得的比值——数值的大小与选用的计量单位有关,对同一物理量测量时,选用的单位越大,数值越小,反之亦然。因此,表示一个被测量的量值简称为**测量值**,必须包含数值和单位两部分。

目前,我国以国际单位(SI)作为法定计量单位,以米(长度)、千克(质量)、秒(时间)、安培(电流)、开尔文(热力学温度)、摩尔(物质的量)、坎德拉(发光强度)作为基本单位,其他量的单位均可由这些基本单位导出,称为国际单位的导出单位。

二、直接测量与间接测量

按照测量值获取的方法不同,测量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测量,称为**直接测量**,相应的物理量称为**直接测量量**。如用游标卡尺测量长度、用天平测量质量、用秒表测量时间等就是直接测量。但实际上能够进行直接测量的物理量并不多。

利用被测量与某些直接测量量的函数关系,经过运算从而得到被测量的测量值的测量,称为**间接测量**,相应的物理量称为**间接测量量**。如测量金属小球的密度时,由直接测量得到小球的直径 d 和质量 m ,代入密度公式

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{6m}{\pi d^3}$$

即可求出金属小球的密度。大多数物理量的测量都属于间接测量。

有些物理量既可以直接测量,也可以间接测量,这主要取决于使用的仪器和测量的方法。

三、等精度测量和不等精度测量

根据测量条件的不同,测量也可分为等精度测量和不等精度测量两类。

如果对某一物理量在相同条件下(同一仪器、同一方法、同一环境、同一测量者)进行多次重复测量,尽管各次测量值并不完全相同,但由于没有理由判断哪一次测量更准确些,故可以认为每次测量都是在相同精度下测得的,称为**等精度测量**,这样的一组数据称为**测量列**。如果在多次测量中每次测量条件有变化,那么这样的测量就是不等精度测量。例如在用多挡位电流表测电流时,为防止烧坏电表,总是先用大量程挡位粗测后,再用小量程挡位细测,这种测量便是不等精度测量。

等精度测量和不等精度测量的数据处理方法是不同的,在本课程中的多次重复测量都认为是相同条件下的等精度测量。

第2节 测量误差

任何物质都有自身的各种特性,反映这些特性的物理量在客观上所具有的真实数值,称为**真值**。测量的目的就是要找到被测量的真值。然而在实际测量中,由于仪器的精度所限、测量者观察力的差异、实验方法和实验条件等因素的局限,在任何测量中,测量值与真值之间总是存在着一定的差异,这种差异称为**测量误差**,简称**误差**。若用 a 表示测量值的真值,用 x 表示测量值,则测量误差 ϵ 可表示为

$$\epsilon = x - a \quad (1-1)$$

误差存在于一切测量中,而且贯穿于实验的全过程。每使用一种仪器,每进行一次测量,都存在误差;测量方法越繁多,实验的仪器设备越复杂,经历的时间越长,引起误差的机会和可能就越多。因此,任何一个测量结果,如果不对其误差给出一个适当的估算,这样的测量结果是没有意义的。通过正确的误差分析,可以指导我们合理地选择测量方法、仪器和条件,以便在最有利的条件下尽量消除或减少误差。

一、测量误差的分类

根据误差产生的原因、性质和特点,可把误差分为系统误差、随机误差、过失误差3种。

(一) 系统误差

在相同条件下,对同一物理量多次测量,误差的绝对值和符号保持恒定或以可预知的方式变化,这样的误差称为**系统误差**。

1. 系统误差的主要来源

(1) **仪器误差**:仪器本身的缺陷或未按规定条件使用仪器而引起的误差。如仪器刻度不准确、天平不等臂、砝码未经校准、仪器零点未经校准、仪器的水平或铅直未调整好等。

(2) **理论(方法)误差**:由于测量所依据的理论公式的近似性和实验方法不完善所导致

的误差。如测量物体的质量时忽略了空气浮力的影响,采用伏安法测电阻时没有考虑电表内阻对实验结果的影响等。

(3) 环境因素:外界环境(光线、温度、湿度、气压、电磁场等)变化或实验条件不能达到理论公式所规定的要求所产生的误差。如测量物体的体积时未考虑物体热胀冷缩的影响等。

(4) 人为因素:测量者个人的生理特点或固有习惯带来的误差。如估计读数时总是偏大或偏小等。

系统误差的特征是确定性。这种由某些确定因素产生的误差对测量结果的影响也是确定的,它总是使测量结果向一个方向偏移,即测量结果与真值相比总是偏大或偏小,因此不能通过增加测量次数的办法来减小或消除。我们应根据具体的实验条件,找出产生系统误差的主要原因,采取适当措施降低或消除它的影响。在实验中发现和消除系统误差是很重要的,它常常是影响测量结果准确程度的主要因素。

2. 系统误差的处理 如果我们能够确定系统误差的数值,这类误差称为已定系统误差。如螺旋测微计的零位误差、伏安法测电阻时电表内阻引起的误差等,实验时只要对测量值进行修正,或对实验方法的误差进行补偿,就可以消除误差。

例如螺旋测微器的零点读数为 0.008mm , 现在测得金属小球的直径的读数为 6.002mm , 则金属小球直径 d 的实际值为

$$d = 6.002 - 0.008 = 5.994(\text{mm})$$

如果只知道系统误差存在于某个大致范围,而不知道它的具体数值,这类误差称为未定系统误差。未定系统误差是一个较为复杂的问题,没有普遍规律可以遵循,通常只能对其误差范围做出估算,如仪器的最大允许误差等。

发现并减小系统误差是一项困难而又重要的工作,需要对整个实验所依据的原理、方法、仪器和步骤等可能引起误差的各种因素进行分析。系统误差一般应通过校准仪器、改进实验装置和实验方案、对测量结果进行修正等方法加以消除或尽可能减小。

(二) 随机误差

在相同条件下,对同一物理量多次测量,误差的绝对值和符号以不可预知的方式变化,这样的误差称为随机误差,也称为偶然误差。随机误差是实验中各种因素的微小变动引起的,使得测量值围绕真值发生无规则的涨落。

1. 随机误差的主要来源

(1) 实验装置的变动性:实验装置在各次调整操作上的变动性、测量仪器指示数值的变动性等产生的误差。如螺旋测微计测力在一定范围内随机变化等。

(2) 测量者在判断和估计读数时的变动性:主要指测量者的生理分辨本领、感官灵敏度、手的灵活性及熟练程度等带来的误差。如读数时的视差影响等。

(3) 实验条件和环境因素的变动性:如温度、湿度的起伏变化,电压、气流的波动等因素引起的误差。

随机误差的特征是随机性。这种由不确定因素产生的误差对测量结果的影响是随机的,也就是说,在相同条件下对同一物理量进行多次重复测量时,某一次测量误差的绝对值与正负是无法预知的,测量值与真值相比,偏大或偏小具有偶然性。但当测量次数足够多时,随机误差服从一定的统计分布规律。

2. 随机误差的分布 实践和理论都证明,在不考虑系统误差的情况下,对某一物理量

在同一条件下进行多次测量,当测量次数足够多时测量的随机误差一般服从正态分布(又称为高斯分布)规律,即随机误差具有以下特征:

- (1) 单峰性:绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。
- (2) 对称性:绝对值相等的正负误差出现的概率相等。
- (3) 有界性:在一定的测量条件下,误差的绝对值不超过一定限度。
- (4) 抵偿性:当测量次数足够多时,正负误差可大致相互抵消,随机误差的代数和趋于零。

多次测量时随机误差的分布具有抵偿性,是我们在实验中采取多次重复测量的依据。因此,通过多次重复测量,用统计方法处理可以减小随机误差对测量结果的影响,并估算误差的大小,但不可能消除随机误差。

随机误差的正态分布曲线如图 1-1 所示。横坐标表示误差 ϵ ,纵坐标为一个与误差出现的概率有关的概率密度函数 $f(\epsilon)$ 。应用概率论的数学方法可导出概率密度函数为

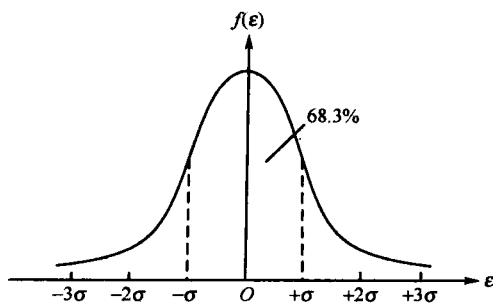


图 1-1 正态分布曲线

$$f(\epsilon) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\epsilon^2}{2\sigma^2}} \quad (1-2)$$

式中 σ 为测量次数 $n \rightarrow \infty$ 的特征量

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - a)^2}{n}} \quad (1-3)$$

是一个与实验条件有关的常数,称为标准误差。

按照概率理论,测量的随机误差出现在 $[\epsilon, \epsilon + d\epsilon]$ 内的概率为 $f(\epsilon)d\epsilon$,所以某次测量的随机误差出现在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间内的概率 P 就是该区间内 $f(\epsilon)$ 曲线与横坐标所包围的面积,即

$$P(-\sigma < \epsilon < +\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\epsilon) d\epsilon = \int_{-\sigma}^{+\sigma} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\epsilon^2}{2\sigma^2}} d\epsilon = 68.3\% \quad (1-4)$$

这说明任一次测量,其测量误差出现在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间内的概率为 68.3%。需要注意的是标准误差 σ 与各测量值的误差 ϵ 有着完全不同的含义。 ϵ 是实在的误差值, σ 并不是一个具体的测量误差值,它反映在相同条件下进行一组测量后,随机误差出现的概率分布情况,是一个统计特征量。区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 称为置信区间,相应的概率称为置信概率。显然,置信区间扩大,则置信概率提高。置信区间取 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 时,相应的置信概率 $P(3\sigma) = 99.7\%$ 。也就是说,在相同条件下对某一物理量进行 1000 次测量,测量的误差可能有 683 次落在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间内;在 1000 次测量中只有 3 次的测量的误差绝对值会超过 3σ 。由于在一般的测量中次数很少超过几十次,因此可认为测量误差超出 $\pm 3\sigma$ 范围的概率极小,故把 3σ 称为极限误差。

当测量次数足够多时,测量列的误差分布服从正态分布。但在实际测量中,由于测量次数总是有限的,特别是当测量次数很少时,测量列的误差分布将偏离正态分布,而更符合 t 分布。一般仪器的测量误差也不服从正态分布,而是服从均匀分布。

(三) 过失误差(错误)

由于读数错误、记录错误、操作错误或仪器故障等原因产生的误差称为过失误差。这类数据严重失实,可用和另一次测量结果(数据)相比较的方法发现纠正,或运用异常数据剔除准则来判断因过失而引起的异常数据并予以剔除。所以,在做误差分析时,要估计的误差通常只有系统误差和随机误差。

误差和错误不同。错误是由于测量者不小心或测量方法不正确造成的,只要测量者端正工作态度,严格按照操作规程操作,根据实际问题选用正确的测量方法,就能避免错误。但是,误差是不可避免的。随着科学的发展和测量技术的不断提高,误差可以被控制得越来越小,但误差不可能降低至零。

二、测量结果的精密度、准确度和精确度

精密度、准确度和精确度是从测量误差的角度来评价测量结果好坏的3个术语,含义不同,使用时应加以区别。

1. 精密度 表示多次重复测量所得的各测量值之间相互接近的程度。用来描述测量结果重复性的优劣,反映测量中随机误差的大小。

2. 准确度 表示测量值与真值的接近程度。用来描述测量结果准确性的高低,反映测量中系统误差的大小。

3. 精确度 表示测量结果与被测量的(约定)真值之间的一致程度。是对测量结果的精密度和准确度的综合评价,反映了测量结果中总的误差情况。

精密度高说明重复性好,测量数据比较集中,测量的随机误差较小;准确度高说明测量值接近真值,测量数据的平均值偏离真值较小,测量的系统误差较小;精确度高说明精密度和准确度都高,测量数据比较集中在真值附近,即测量的系统误差和随机误差都比较小。

图1-2所示的子弹打靶时弹着点的分布情况形象地表示了精密度、准确度和精确度三者的区别。我们把打靶比做测量,每一次的弹着点表示一次测量值,而靶心为真值。图1-2(a)的弹着点比较集中,但偏离靶心,表示精密度高而准确度低,即随机误差小而系统误差大;图1-2(b)的弹着点以靶心为中心均匀分布,但分布较分散,表示准确度高而精密度低,即系统误差小而随机误差大;图1-2(c)的弹着点以靶心为中心均匀分布,而且较集中,表示精密度与准确度都较高,即精确度高,总的误差较小。

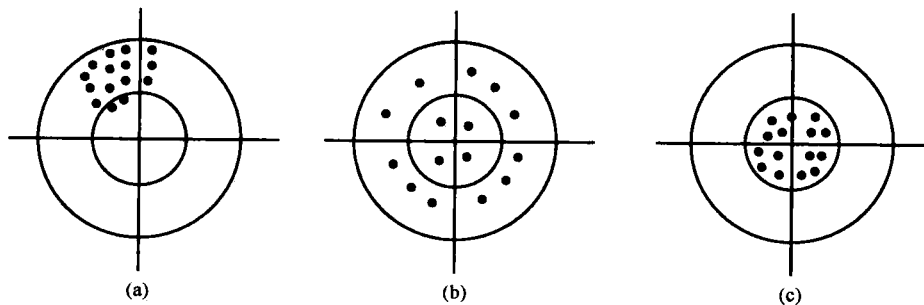


图 1-2 精密度、准确度、精确度示意图