

高等学校“十三五”规划教材

# 大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

○ 崔金玉 主编 王丽 滕继慧 副主编



化学工业出版社

高等学校“十三五”规划教材

# 大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

◆ 崔金玉 主编 王丽 滕继慧 副主编



化学工业出版社

·北京·

本书是以教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会制定的“非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求”为指导，结合编者所在学校大学物理实验教学内容和课程体系改革成果，为适应应用技术型大学发展需要编写而成的。

全书共五章，系统介绍了物理实验课程的教学培养目标、实验数据处理知识、基本物理实验方法和操作技术，编入了基础性实验、综合与应用性实验和设计与研究性实验共三十六项。本书主要特点有：一，力求易读性、应用性和科学性相结合，保证学生顺畅掌握知识点，做到学以致用；二，紧密贴近课堂教学，为学生的学习服务，与物理实验课程的教学体系相配套；三，努力做到传授知识与培养创新能力相融合，着重训练学生查阅资料能力、实验方案设计能力以及对实验结果分析和研究的能力，激发学生创新精神。

本书可作为普通高等学校理、工、医、药、农等各专业的物理实验教材或教学参考用书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验/崔金玉主编. —北京：化学工业出版社，2018.10

高等学校“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-33009-3

I. ①大… II. ①崔… 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 (2018) 第 209981 号

责任编辑：郝英华

装帧设计：张 辉

责任校对：秦 姣

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）

印 刷：三河市航远印刷有限公司

装 订：三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张15¼ 字数390千字 2019年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询：010-64518888

售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：46.00 元

版权所有 违者必究

大学物理实验是高等学校对大学生进行较系统的科学实验基础训练的一门独立的课程。大学物理实验所覆盖的知识面和信息量极为丰富,大学物理实验的过程融理论、方法、技能和数据处理于一体,它在培养学生运用实验手段去分析、观察、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,都起着重要作用,为培养学生的科技创新能力提供了有力支持。同时,它也将为学生今后的学习、工作奠定良好的基础。

本书根据物理实验教学本身的规律,按实验的难易程度和本课程培养目标的要求,采用了“分层次”的课程体系,即基础性实验、综合与应用性实验和设计与研究性实验。分层次的教学体系的基本原则是教师要主动适应学生的接受能力,引导学生“爬楼梯”,使学生循序渐进地掌握科学实验的基本知识、基本方法和基本技能。

全书共五章。第一章绪论,介绍了实验课前应当做的准备工作及操作课上应注意的事项,这是科技人员应具备的最基本的科学素养。学生在做某一实验课题时,应该反复阅读有关内容,这不仅能使学生在事半功倍地完成实验课题,更重要的是能在潜移默化中培养学生严谨的治学态度和科学的思维方法。第二章物理实验数据处理的基本方法,根据我国“数据处理技术规范”的基本精神,结合本门课程的实际,进行了大量的简化编写而成。目前许多高等学校的物理实验教学中都引入了不确定度理论,但对某些概念的理解和运用上还存在一些差异。本书在处理这一类问题时,力求做到科学性、简洁性和通用性的完美结合,使物理实验数据的处理方法与后续实验课程的数据处理方法相一致,也与当代社会生产与科技部门的相关规定相一致。第三章编入基础性实验 13 项,第四章编入综合与应用性实验 12 项,第五章编入设计与研究性实验 11 项。

本书由崔金玉主编,王丽、滕继慧副主编,闵月月、赵涛、孙炳全、刘凤智、谢彬、张大伟、孙佳佳参编,赵凤芹主审。具体分工:崔金玉编写实验九、十、十二、二十八、三十三;王丽编写实验四、七、十九、十一、十三、二十七;滕继慧编写实验三、十五、十六、二十五、三十五;闵月月编写实验五、十四、二十一、二十二、三十二;赵涛编写第一章及

实验十七、十八、三十四；孙炳全编写第二章及实验一、二十九、三十；刘凤智编写附录及实验八、二十、二十六；张大伟编写实验二、三十六；谢彬编写实验二十四、三十一；孙佳佳编写实验六、二十三。霍凤伟负责核对全书。

由于编者水平有限，难免有不足之处，望读者批评指正。

编者

2018年6月

## 第一章 绪论

## 第二章 物理实验数据处理的基本方法

第一节 物理量的测量及结果表达 .....	6
第二节 有效数字及其运算法则 .....	9
第三节 测量误差及分析 .....	12
第四节 直接测量的数据处理 .....	14
第五节 间接测量的数据处理 .....	17
第六节 双变量测量的数据处理 .....	21
练习题 .....	26
阅读材料 .....	27

## 第三章 基础性实验

实验一 规则物体密度的测量 .....	37
实验二 用拉脱法测量液体表面张力系数 .....	43
实验三 用复摆测重力加速度 .....	49
实验四 刚体转动惯量的测量 .....	55
实验五 液体黏度的测量 .....	59
应用实例 .....	63
实验六 霍尔效应法测量磁感应强度 .....	64
实验七 固体比热容的测量 .....	68
实验八 惠斯登电桥测电阻 .....	70
实验九 电位差计的使用 .....	75
实验十 电表的改装 .....	79

阅读材料 .....	83
实验十一 透镜焦距的测量 .....	84
阅读材料 .....	88
实验十二 牛顿环实验 .....	89
实验十三 光敏传感器的光电特性测量实验 .....	94

#### 第四章 综合与应用性实验

实验十四 梁弯曲法测量杨氏弹性模量 .....	103
阅读材料 .....	114
实验十五 用双臂电桥测量低电阻 .....	115
实验十六 电子示波器的调节和应用 .....	120
实验十七 分光计的调节和使用 .....	126
实验十八 用光栅测量光波的波长 .....	134
实验十九 磁阻效应及磁阻传感器的特性研究 .....	139
实验二十 热电偶温度计的定标与测温 .....	144
实验二十一 声速的测量 .....	150
实验二十二 固体热导率的测量 .....	154
阅读材料 .....	158
实验二十三 电介质介电常数的测量 .....	160
阅读材料 .....	165
实验二十四 密立根油滴法测量电子电荷 .....	166
实验二十五 全息照相 .....	171
阅读材料 .....	177

#### 第五章 设计与研究性实验

实验二十六 不规则石蜡块密度的测量 .....	178
实验二十七 伏安法测电阻及电表的选择 .....	179
实验二十八 万用表电路的设计与组装 .....	183
实验二十九 交流电桥的设计和应用 .....	190
实验三十 迈克尔逊干涉仪的组装、调节和应用 .....	197
实验三十一 电饭锅温度控制电路的设计与组装 .....	204
实验三十二 声光效应 .....	209
实验三十三 高温超导材料的基本特性 .....	213

实验三十四	数字信号光纤通信技术实验 .....	217
实验三十五	黑箱实验 .....	221
实验三十六	磁性液体表观密度的实验研究 .....	223

## 附 录

附录 1	袖珍计算器的使用 .....	227
附录 2	电磁学实验基本知识 .....	230
附录 3	光学实验基本知识 .....	238
附录 4	中华人民共和国法定计量单位 .....	240
附录 5	一些常用的物理数据表 .....	243

# 第一章 绪论

## 一、大学物理实验课程与人才培养

### 1. 科学实验的地位与作用

人类改造自然的实践活动不外两种：一是生产实践，二是科学实验。所谓科学实验，是人们按照一定的研究目的，借助特定的仪器设备，人为地控制或模拟自然现象，突出主要因素，对自然事物和现象进行精密、反复的观察和测试，探索其内部的规律性。这种对自然的有目的、有控制、有组织的探索活动是现代科学技术发展的源泉。原子能、半导体、激光等科技成果仅仅依靠总结生产技术经验是发现不了的，只有在科学家的实验室里才会被发现。现代化的企业为了不断地改进生产过程和创新产品，也十分重视实验研究工作，都有相当规模的研究实验室。因而科学实验是科学理论的源泉，是自然科学的根本，是工程技术的基础，同时科学理论对实验起着指导作用。要处理好实验和理论的关系，重视科学实验，重视进行科学实验训练的实验课教学。

### 2. 大学物理实验课程的地位与作用

物理学本身是一门实验科学，无论是物理规律的发现，还是物理理论的验证，都要取决于实验。例如，杨氏的干涉实验使光的波动学说得以确立，赫兹的电磁波实验使麦克斯韦的电磁波理论获得普遍承认，卢瑟福的 $\alpha$ 粒子散射实验揭开了原子的秘密，近代的高能粒子对撞实验使人们深入到物质的最深层——原子核和基本粒子内部来探索其规律性。在物理学发展过程中，人类积累了丰富的实验方法，创造出各种精密巧妙的仪器设备，涉及广泛的物理现象，因而使物理实验课有了充实的实验内容。

大学物理实验课程属性是科学实验方法基础，是对高校理工专业学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程，是学生在高等学校受到系统实验技能训练的开端。大学物理实验所覆盖的知识面和信息量极为丰富，根据我们的实践和认识，大学物理实验课有如下特点：它是在误差理论思想指导下为达某项目标而进行的实验，是手脑并用的复杂劳动；它要有恰当的方法，以使所要观测的物理现象或过程能够实现，并达到符合一定准确度的定量测量要求；它需要技能，如实验方案的选择、仪器设备的调整与操作、物理现象的观察与分析等；它的语言是数据，实验的成功与失败，好与差，必须用数据来说明。所以大学物理实验的过程融理论、方法、技能和数据处理于一体，它在培养学生运用实验手段去分析、观察、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，都起着重要作用，为培养学生的科技创新能力提供了非常优越的条件。同时，它也将为学生今后的学习、工作奠定良好的基础。

### 3. 大学物理实验课的教学培养目标

(1) 学习和掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能

① 掌握测量误差、有效数字、不确定度等基础知识。

- ② 掌握实验数据处理基本方法。
- ③ 掌握基本仪器的结构原理、使用方法和操作技术。
- ④ 掌握预习、实验操作和撰写实验报告等基本实验程序。
- ⑤ 掌握常用物理量基本测试方法，并能在实际工作中应用。

#### (2) 培养与提高学生的科学实验能力

① 自学能力。能够自行阅读实验教材和参考资料，正确理解实验内容，作好实验前的准备。

② 动手实践能力。能够借助教材和仪器说明书，正确调整使用常用仪器。

③ 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。

④ 表达书写能力。能够正确记录和处理实验数据，绘制图线，说明实验结果，撰写出有见解的实验报告。

⑤ 简单的实验设计能力。能够根据课题要求，确定实验方法和条件，合理选择仪器，拟定具体的实验程序。

#### (3) 培养和提高学生从事科学实验的素质

① 理论联系实际和实事求是的科学作风。

② 严肃认真的工作态度，不怕困难、主动进取的探索精神。

③ 遵守操作规程、爱护公共财产的优良品德。

④ 在实验过程中相互协作、共同探索的合作精神。

## 二、大学物理实验课的教学环节和要求

做一个实验包括三个教学环节：课前预习，课堂实验操作，撰写实验报告。课堂实验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。

### 1. 课前预习

实验教材是进行实验的指导书。它对每个实验的目的与要求、实验原理都做了明确的阐述。因此，在上实验课前都要认真阅读，必要时还应阅读有关参考资料。对于所涉及测量仪器，在预习时可阅读教材中有关该仪器的介绍，了解其构造原理、工作条件和操作规程等，必要时可到实验室去观察实物，并在此基础上写好预习报告。预习报告内容主要包括以下几个方面。

(1) 实验题目 实验项目名称。

(2) 仪器设备 实验中使用的主要仪器设备。

(3) 实验原理 列出有关测量的计算式及条件（要明确哪些物理量是直接测量量，哪些物理量是间接测量量，用什么方法和测量仪器等），必要时需绘出电路图、光路图或设备示意图。

(4) 实验步骤 把实验步骤写在纸面上，它就成了一张操作路线图，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。

(5) 数据记录表格 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，很容易出错，这种做法在实验课堂上是不允许的。

## 2. 课堂实验操作

进入实验室应遵守实验室规章制度和学生实验守则。认真听取指导教师讲解仪器设备使用注意事项和使用方法,在教师指导下正确使用仪器,注意爱护,稳拿妥放,防止损坏。对于电磁学实验,必须由指导教师检查电路的连接正确无误后,方可接通电源进行实验。

实验结束,要把原始实验数据记录交给指导教师检查签字,对不合理的实验数据还要补做或重做。离开实验室前要整理好使用过的仪器,做好清洁工作,填好实验记录,经教师同意后,方可离开实验室。为更好完成课堂实验,还要牢记以下事项。

(1) 关于仪器 实验仪器放在实验台上的位置,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,经常需要操纵或调节的仪器,应放在便于操纵的位置上,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。

仪器在使用过程中,难免发生故障,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,可以独立地去排除,否则应报告指导教师,待故障排除后,才能恢复做实验。

(2) 关于读数 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,在标尺或仪表上得到读数。读数时要注意以下各点。

① 有效数字取位要合理,要读到有误差(可疑)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等。

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,不要迫不及待的记录读数,因为指示器可能还在缓慢地移动。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,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。如一时找不到原因,应及时报告指导教师。

(3) 关于原始实验数据记录 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 用专用的原始实验记录本记录实验内容、现象和数据。在原始记录里,除实验数据外,还应载明实验日期、实验题目、仪器编号以及操作过程中出现的异常现象等,有时还需记下室温、大气压、湿度等环境条件。

② 实验数据应直接记录在表格里,数据表要单独一页。实验中每次读到一个数据,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。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。

③ 数据表应有表序和表名。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。表名应能确切表达数据表的特定内容。例如,测量一个细长钢棒的体积,其数据表的表名可拟为“细长钢棒的几何尺寸”,如例1-1所示。

## 【例 1-1】

表 1 细长钢棒的几何尺寸

$$\Delta_{\text{仪}}(d)=0.02\text{mm} \quad \Delta_{\text{仪}}(L)=0.004\text{mm}$$

次数	1	2	3	4	5	6
直径 $d$ $/\times 10^{-3}\text{m}$	5.32	5.34	5.36	5.36 <del>5.38</del>	5.34	5.32
长度 $L/\text{m}$	0.8725	0.8721	0.8724 <del>0.8728</del>	0.8723	0.8726	0.8722

④ 实验室提供的数据、仪器误差、关键的实验条件等应列在表格之上。

⑤ 用钢笔或圆珠笔记录数据，不要用铅笔。数据应占空格中一半位置，如例 1-1 中表 1 所示。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，轻轻画一斜杠，并在上边写上正确的数据，如例 1-1 所示。留下错误数据的笔迹，可能对日后分析测量结果时有参考价值。

### 3. 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：实验名称、实验目的、原理简述、实验方法、数据记录、数据处理与结果分析、实验总结与讨论七个部分。

下面分别对“报告”中各部分的写法提出一些要求。

(1) 关于“实验名称”和“实验目的”一般应与教材中提法一致。

(2) 关于“原理简述”应该是在理解原理的基础上用自己的语言简要叙述，要求做到简明扼要，图（原理图、光路图、电路图）文并茂，并列测量和计算所依据的公式，注明公式中各量的物理意义及公式的适用条件。

(3) 关于“实验方法”只要写出关键性的调整方法和测量技巧，不是具体操作步骤的叙述，而是个人理解的简述，可简可详。

(4) 关于“数据记录”一般要求以列表形式来反映完整而清晰的原始测量数据。

(5) 关于“数据处理与结果分析”要求写出数据处理的主要过程、图线、误差分析等，在计算处理完成以后，必须以醒目的方式完整地表示出实验结果。

(6) 关于“实验总结与讨论”内容不受限制，可以是对观察到的实验现象进行分析，对结论和误差原因进行分析，也可以对实验方案及其改进意见进行讨论评述。这是实验报告中最开放、最灵活的部分，重在说理，能反映实验者观察和分析能力的高低。

总之，物理实验课有着自己的特点和规律，要学好这门课不是件容易的事情。希望同学们在学习过程中不断提高对它的兴趣，打好基础，注意培养自己成为优秀的科学技术人才。

## 三、物理实验学生守则

(1) 要爱护实验室一切公物，保持实验室安静、整洁，遵守纪律。

(2) 遵守上课时间。迟到超过 10 分钟及以上者，不允许进入实验室。

(3) 不允许携带任何食品进入实验室。进入实验室后，要将书包等物品放在指定位置，

不许放在实验台上。

(4) 学生进入实验室后,要将写好的预习报告交指导教师检查,经教师检查同意后方可进行实验。不写实验预习报告者不允许做实验。

(5) 实验前要仔细检查所用实验仪器是否齐全、完好。如果有缺损,要及时报告教师处理,不得擅自搬弄其他组仪器。

(6) 做实验时,要严格遵守所用仪器的操作规程和注意事项,不得擅自拆仪器,以防发生人身事故和仪器损坏。对违反操作规程而损坏仪器的学生,教师按学校有关规定处理。完成实验后,要将实验仪器设备整理还原。

(7) 实验数据记录在数据表格中。记录完成的实验数据要交指导教师审查,合格的指导教师签字通过;数据不合格的要求学生重测数据直至合格,并由指导教师签字通过。未经指导教师签字的数据无效。

(8) 实验报告要在完成实验的下一周内交给实验组长,由实验组长统一交指导教师批改。迟交实验报告将酌情降低实验成绩。

(9) 有事或有病者必须有相应的有效假条(医院出具的诊断书、有主管系书记签字的证明等),课前向任课教师请假,在约定的时间补做。少做实验项目者期末无总成绩。

(10) 在实验过程中,对严重违反实验纪律和伪造实验数据者,实验成绩按零分计,教师有权终止本次实验。

(11) 抄袭实验报告、雷同实验报告、替做实验等实验成绩记为零分。

## 第一章

### 第一章 绪论

## 第二章 物理实验数据处理的基本方法

大学物理实验的教学目的是培养科技实践基本技能和科技创新能力，它需要通过完成一定数量的实验题目来实现。在科学研究、工程技术、商贸结算、医疗卫生以及日常生活各个领域都离不开测量。测量的目的是为了获得测量结果，在一些重要的测量中，还要求对测量结果的质量（可信程度）给出定量的说明，因为测量结果的质量往往会影响国家和企业的经济利益。测量误差必须正确计算和评定。误差评定过大，错误地夸大了误差范围，会使本来合格的产品被宣判为废品，会使本来合格的工程增加不必要的再投资；误差评定过小，会使本来不合格的产品或工程投入使用，给国家和人民生命财产带来危害。如出口货物时，对货物的称重，希望既不要多，也不要少。多了，会使货物白白流失，少了，可能会遭遇索赔。又如对卫星质量或火箭燃料质量的测量，若测量不准，就有可能导致卫星发射的失败。再如，使用放射线治疗疾病，对放射剂量的测量必须准确，剂量少了，达不到治疗的目的而延误治疗，剂量多了，会对人体造成伤害。但是在实际工作中，测量误差是不可避免的，任一测量结果都必然带有误差。不同的应用场合，对误差的限值有不同的要求。因此，在报告测量结果时，应该对这一测量结果可能包含的误差范围，给出定量的说明，这就是测量结果及不确定度。在大学物理实验教学中，通过实验操作而得到测量数据，通过数据处理而得到测量结果及不确定度。由此看来，处理实验数据的能力，是科技人员及管理人员必备的实践能力之一，在校学生学习一点物理实验数据处理的知识是十分必要的。

### 第一节

## 物理量的测量及结果表达

为获得被测物理量的量值而实施的一组操作称为测量。这个定义中所说的“一组操作”，是实验的全过程，既包括实验操作，也包括数据处理，直到给出测量结果。

### 一、测量及其分类

#### 1. 直接测量和间接测量

根据测量方法，可将测量分为直接测量和间接测量两大类。

直接测量是指可直接从测量仪器或量具上读出待测量大小的测量。例如用卡尺测直径，用天平测物体的质量，用电压表测电路中电压等。间接测量是指利用直接测量量与被测量之间的已知函数关系，通过运算而得到该被测量的量值，例如通过测量电路中的电流和电阻上的电压，再用公式计算出该电阻的阻值。

某物理量能不能直接测量并不是绝对的。随着科学技术的发展，测量仪器的研发，很多

原来只能间接测量的物理量,可以实现直接测量了。例如测量密度的基本方法是典型的间接测量,但借助专用传感器也可以实现直接测量。大学物理实验中大多数物理量的测量都是间接测量,但直接测量是间接测量的基础。

## 2. 单次测量和多次测量

根据具体测量方案,对某物理量可安排单次测量或多次测量。当随机误差远小于系统误差时,或因条件限制只能测量一次时,或对测量结果精度要求不高时采取单次测量。一般情况应采取多次测量。

## 3. 等精度测量和非等精度测量

对多次测量,根据测量条件是否相同,又可分为等精度测量和非等精度测量。

在相同测量条件下进行的多次测量是等精度测量。如同一个人,使用同一仪器,采用同样方法,在同样的操作环境下,对同一测量对象进行反复多次的测量,获得一组测量数据  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 各次测量结果都是独立的,没有任何理由判断某一次测量更为精确,故将这种具有同样精确程度的测量称为等精度测量,这样的一组测量数据称为测量列。

在对某物理量进行多次测量时,测量条件完全不同或部分不同,各次测量结果的可靠程度也不完全一样,这样的测量称为非等精度测量。处理非等精度测量结果时,需根据每个测量值的“权重”进行“加权平均”,因此在一般的物理实验中很少采用。

由于在实验中一般无法保持测量条件完全不变,所以严格的等精度测量是不存在的。当某些条件的变化对测量结果影响不大或可以忽略时,则可将这种测量视为等精度测量。在大学物理实验中,有关测量误差与数据处理的讨论,都是以等精度测量为前提的。

## 二、测量列实验标准差

实验标准差是表征测量列分散性的量。

对同一物理量重复测量  $n$  次,得到测量列  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。由于随机因素的影响,这些测量值各不相同,当  $n \rightarrow \infty$  时这个测量列的算术平均值

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{n \rightarrow \infty} x_i$$

称为总体均值。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n \rightarrow \infty} (x_i - \mu)^2}{n}}$$

称为总体标准差。在实际工作中  $n \rightarrow \infty$  是做不到的,因此  $\mu$  和  $\sigma$  只是理论上存在,所以有时  $\mu$  称为理论均值,  $\sigma$  称为理论标准差。在实验操作时,  $n$  只能取有限值。当  $n$  有限时,  $x_i$  的算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

称为样本均值,可作为  $\mu$  的最佳估计值。而理论标准差  $\sigma$  的估计值由贝塞尔公式给出

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

称为测量值的实验标准差,有时也称样本标准差。“样本”二字指在无限多个测量值中取有限个测量值为样本。实验标准差  $S(x_i)$  就是表示测量结果的分散性的量。 $S(x_i)$  越大表明测量结果的分散性越大,  $S(x_i)$  越小表明测量结果的分散性越小。当取样本较少,即  $n$  较小时,  $S(x_i)$  的值不稳定,当  $n$  增大时,  $S(x_i)$  值趋于一个稳定的值。

### 三、测量不确定度

测量不确定度表示被测量的真值处于某一量值范围的评定,它表示由于测量误差的存在而对被测量真值不能确定的程度。测量不确定度按字面可理解为对测量结果正确性的可疑程度,也可理解为表征被测量真值所处范围的一个参数。前者只是定性的说明而难以定量的表述,后者因涉及真值这一概念而缺乏可操作性。对测量不确定度最新的定义是:“表征合理地赋予被测量之值的分散性,与测量结果相联系的参数。”分散性的含义为一个量值区间,测量结果在这个区间出现,而不是一个确定的值。

#### 1. 测量列标准不确定度

测量不确定度来源于多个因素,因而它由多个分量组成。其中一些分量可用测量列的统计分布计算,称为 A 类不确定度,用实验标准差表征,记为  $u_A$ 。另一些分量用不同于统计分布的方法计算,称为 B 类不确定度,也用标准差来表征,记为  $u_B$ 。而

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

称为测量列的标准不确定度。

#### 2. 合成标准不确定度

在间接测量的情况下,测量结果  $y$  是其他直接测得量  $x_i$  的函数

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$$

当各  $x_i$  彼此不相关时,按这些量的标准不确定度  $u_i^2$  算得  $y$  不确定度,称为  $y$  的合成标准不确定度,以  $u_c$  表示

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 u_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 u_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u_i^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 u_n^2}$$

式中,  $u_i$  是  $x_i$  的标准不确定度;  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  是  $u_i$  的传播系数。

#### 3. 扩展不确定度

有了合成标准不确定度,可以得到扩展不确定度  $U$ 。扩展不确定度  $U = k u_c$ ,  $k$  称置信系数,通常取  $k = 2$ 。

扩展不确定度是确定测量结果存在区间的量,在这个区间内,包含了合理赋予被测量量值的大部分。假如测量结果为  $\bar{x}$ , 扩展不确定度为  $U$ , 则这个区间是指  $(\bar{x} - U, \bar{x} + U)$ 。扩展不确定度  $U$  与合成标准不确定度  $u_c$  的区别在于:  $U$  所确定的区间比  $u_c$  所确定的区间有更大的置信概率来包含被测量之值,因而在量值上前者比后者大。在某些特殊应用场合也可取  $k = 1$  或  $k = 3$ , 但在表达结果时须注明  $k$  的大小。

### 四、测量结果表达式

得到扩展不确定度,即可得到测量结果表达式

$$y = \bar{y} \pm U$$

下面对结果表达式做几点说明。

(1) 直接测量结果表达也要用扩展不确定度  $U=2u$ ，表达式为  $x = \bar{x} \pm U$ 。

(2) 表明被测物理量的量值以较大概率包含于  $(\bar{y}-U, \bar{y}+U)$  或  $(\bar{x}-U, \bar{x}+U)$  区间之内，这一概率可达到 95% 以上。

(3) 测量结果表达式必须附有被测物理量单位，如测某地区重力加速度  $g$ ，结果表达为

$$g = (9.782 \pm 0.006) \times 10^2 \text{ cm/s}^2$$

## 第二节

### 有效数字及其运算法则

#### 一、有效数字的概念

正确而有效地表示测量和实验结果的数字，称为有效数字。它由可靠的若干位数字加上可疑的一位数字构成。从表达上说从左端第一个非零数字到右端最后一位的所有数字均为有效数字。如测量值 2.72cm 和 2.70cm，都是 3 位有效数字，2.7 是可靠数字，尾数“2”和“0”是可疑数字（估读的），但它们在一定程度上反映了客观实际，因此也是有效的。

应当指出，测量结果第一位（最高位）非零数字前的“0”不属于有效数字，而非零数字后的“0”都是有效数字。前者只反映了测量单位的换算关系，与有效数字无关。例如，0.0125m 是 3 位有效数字，不应理解为 5 位有效数字，它与 1.25cm 实际上是一回事。而非零数字后的“0”则反映了测量的大小和精度，如 1.09cm 是 3 位有效数字，而 1.0900cm 是 5 位有效数字；1.09cm 说明不确定度范围是 0.01~0.09cm，而 1.0900cm 的不确定度范围只有 0.0001~0.0009cm，它的测量精度要高得多。

需要牢记的是有效数字末位数字恒是可疑数字（不确定度所在位）。学生易错的是漏掉可疑位的“0”。如测量值 2.70cm 是 3 位有效数字，可疑位是“0”。如果因为可疑位数字是“0”而漏写（不写），写成 2.7cm，则本来是可靠位数字的“7”被认为成可疑数字，变成了 2 位有效数字，严重降低了测量水平，是错误的。

#### 二、有效数字的读取

在物理实验教学中，经常会遇到读数取几位数和运算结果取几位数的问题，其实只要掌握有效数字末位数字恒是可疑数字这一法则，问题就迎刃而解了。下面就测量值有效数字读取一般规律作简要介绍。

##### 1. 十分度标尺

测量仪器的读数装置带有十分度标尺（最小分度值为 1 个单位）时，读数为可靠位（最小分度值整数倍）加上估读位（可疑位），若读数恰为整数，则估读位记为 0。例如图 2-1 所示，该直尺的分度值是 1mm，读成 84.6mm，末位数 6 是可疑的，如果有人估读为 7，读成 84.7mm 也是合理的。