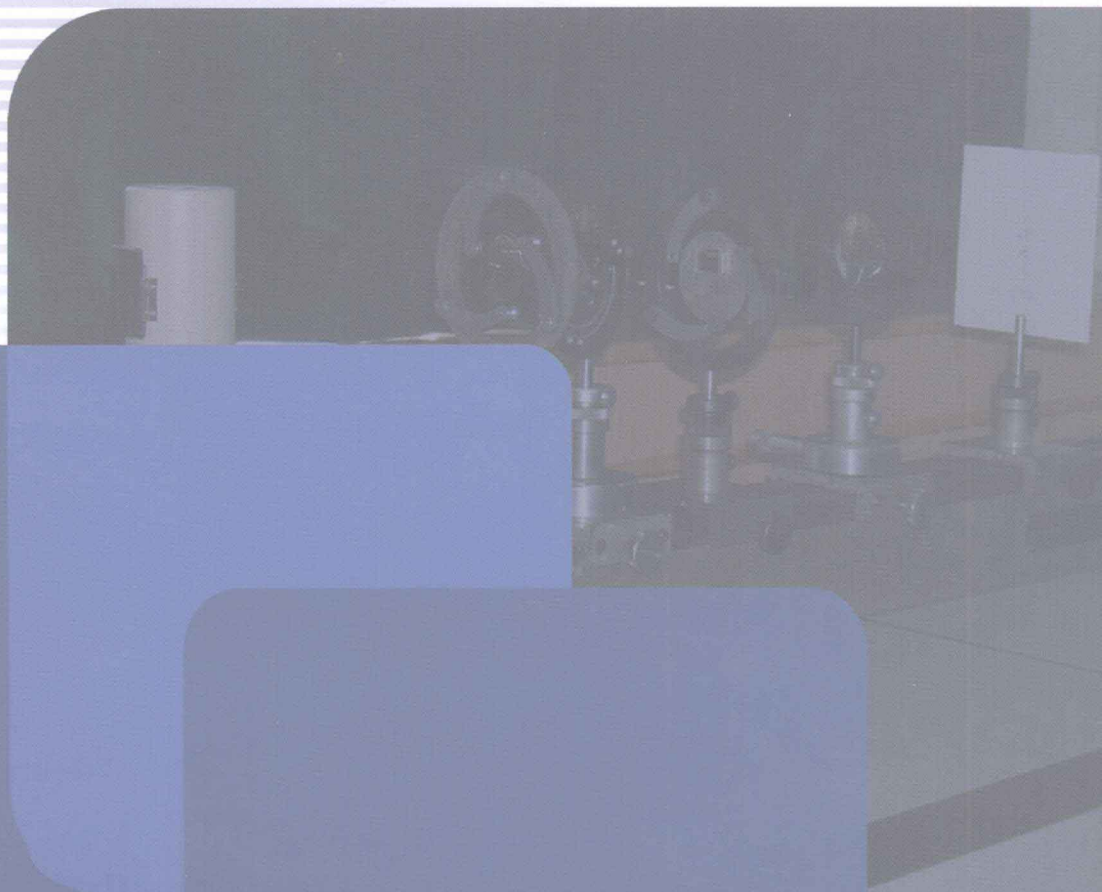


大学 DAXUE 物理实验 WULI SHIYAN

主 编 \ 吴建忠
副主编 \ 舒象喜 尹 胜 向绍纯



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

大学物理实验

主 编 吴建忠

副主编 舒象喜 尹 胜 向绍纯

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 提 要

本书是根据教育部最新制定的《理工科大学物理实验课程教学基本要求》编写的大学物理实验教材,全书共分五章,包括绪论、误差理论基础知识与实验数据处理、基础性实验、提高性实验、设计性实验以及附录。全书以培养学生从事科学实验的基本技能为主线,突出实验设计思想,强调实验的规范性和完整性。原理部分由浅入深,便于自学;操作部分简明扼要,有利于学生预习。

本书可作为高等院校非物理类专业的大学物理实验教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 吴建忠主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2010.8
ISBN 978-7-5643-0799-8

I. ①大… II. ①吴… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第162108号

大学物理实验

主编 吴建忠

*

责任编辑 牛 君

封面设计 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蓉军广告印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 15.375

字数: 384 千字

2010年8月第1版 2010年8月第1次印刷

ISBN 978-7-5643-0799-8

定价: 26.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

大学物理实验是学生进入大学后接触的第一门较为系统、完整的实验课程。它对学生的基本实验技能、科学实验素质和创新思维习惯等诸多方面的培养具有不可替代的作用。学生能够从中领略到物理学家为物理学的发展和社会的进步所作出的杰出贡献,学到他们卓越的物理思想、巧妙的实验设计和精彩的分析问题及解决问题的方法,以及锲而不舍、严谨求实的科学精神。这些思想、方法和精神本身已经超越了物理学的范畴,对所有从事科学研究的工作者都具有普遍的指导作用,学习这些思想、方法和精神将会使学生终生受益。编者结合多年实验教学和课程改革的实践经验,在广泛吸取国内同类教材精华的基础上,参照教育部高等学校物理基础课程教学指导委员会于 2008 年 1 月制定的《理工科大学物理实验课程教学基本要求》编写了本教材。

本教材具有以下三个特点:

(1)低起点、分层次。全书将课程实验分为三个层次。第一层次为基础性实验(共 11 个项目),教学重点是物理实验基本操作技能和操作规程的训练。通过这些基础性实验项目,让学生熟悉物理实验的常用仪器和设备,掌握正确的操作程序,熟悉基本的调试技巧,熟悉数据处理的基本方法,建立不确定度评定的概念。第二层次为提高性实验(共 17 个项目),教学重点是培养学生综合运用物理实验方法的能力。通过这些经典实验项目,使学生从中领略精湛的实验设计思想和巧妙的实验技术,学习常用的物理实验方法和测量方法,增强学生将物理实验原理与实际工程应用有机结合的思维和意识,强化学生实践动手能力。第三层次为设计性实验(共 2 个项目),考虑到大学物理实验教学一般在学生进入大学的第一到第四学期之间进行,学生的理论和专业知识相对较薄弱,不宜安排过多的设计性实验。教学重点是让学生了解科学实验的程序和全过程,培养学生独立思考和解决问题的能力,为以后的科学研究打下基础。

(2)教材精选了部分传统的经典物理实验,在测量方法上引入了现代的新技术和新器件,如在力学、热学及电磁学类实验中大量引入了数字式仪表、光电传感器、力敏传感器、热电偶和集成温度传感器。这有利于学生在学习传统实验方法的同时,又可了解现代的测量技术。

(3)教材突出学生在教学中的主体地位,充分考虑了大学物理实验独立开课和学生物理知识相对薄弱的实际情况,为了便于学生自学,教材对每个实验项目均提出了明确的“实验目的”,对各项实验的原理均力求深入浅出地阐明其物理意义,以便学生能理解其中的缘由,减少盲目性。对实验项目涉及的主要仪器与设备的性能和使

用方法，教材都给予了简要的说明，大部分实验项目都给出了规范的实验步骤，以便于学生通过阅读，掌握其操作程序，从而形成科学的思维模式和养成良好的实验习惯。每个实验均附有“思考题”，这些“思考题”一般为相关实验的环境变化、条件变化或方法变化后，实验结果或实验现象将如何变化的更深层次的问题，以利于开拓学生思维。

教材在绪论部分详细介绍了用计算机软件 Excel 处理实验数据的方法，便于学生自学，附录部分给出了国家法定的计量标准和常用的物理数据，供实验时查阅。

编写过程中，编者参阅了大量相关著作和文献，在参考文献中未能一一列出，在此向相关文献的作者表示诚挚的感谢和敬意，并请对我们工作中的不周之处予以谅解。

由于编者水平有限、时间仓促，书中不妥之处在所难免，恳请读者和同行、专家不吝批评、指正。

编 者

2010 年 6 月于怀化

目 录

第一章 绪 论	1
第二章 误差理论基础知识与实验数据处理	6
第一节 测量与误差	7
第二节 不确定度的估算	14
第三节 有效数字及其运算	25
第四节 实验数据处理的基本方法	28
第五节 实验中的基本测量方法和操作技术	44
第三章 基础性实验	54
实验一 长度与质量的测量	54
实验二 伏安法测电阻	62
实验三 示波器的使用	70
实验四 薄透镜焦距的测量	82
实验五 验证牛顿第二定律	87
实验六 单摆法测重力加速度	94
实验七 电表的改装与校准	97
实验八 霍尔效应测磁场	103
实验九 牛顿环	112
实验十 迈克尔逊干涉仪的调节与使用	117
实验十一 分光计的调节与使用	122
第四章 提高性实验	130
实验十二 动量守恒和机械能守恒研究	130
实验十三 动态法测材料的杨氏模量	134
实验十四 三线摆法测转动惯量	139
实验十五 水的比汽化热的测定	145
实验十六 冷却法测金属的比热容	149
实验十七 拉脱法测液体的表面张力系数	153
实验十八 稳态法测不良导体的导热系数	157
实验十九 RLC 电路暂态特性研究	161
实验二十 RLC 电路稳态特性研究	167
实验二十一 RLC 电路谐振特性研究	173
实验二十二 交流电桥的原理和应用	178

实验二十三	自组望远镜	186
实验二十四	自组投影仪	189
实验二十五	杨氏双缝干涉实验	192
实验二十六	光速的测定	196
实验二十七	密立根油滴实验	202
实验二十八	夫兰克-赫兹实验	209
第五章	设计性实验	216
	设计性实验概述	216
实验二十九	重力加速度的测量	218
实验三十	万用表的设计、制作与校准	219
附 录		227
附录 A	中华人民共和国法定计量单位	227
附录 B	基本物理常数和部分常用物理量数值	229
附录 C	重要物理实验编年史（至 1996 年）	235
参考文献		239

第一章 绪 论

一、科学实验的地位与作用

科学实验是指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、激光等最新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程的学习。

二、物理实验的地位与作用

物理学是一门实验科学，无论是物理规律的发现，还是物理理论的验证，都取决于实验。例如，杨氏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 α 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去探索其规律性。在物理学发展的过程中，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。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；同时，它也将为学生今后的学习、工作打下良好的基础。

三、物理实验课的教学目的

本课程的教学培养目标是要在以下几方面帮助学生学有所成：

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，深刻理解和掌握这些实验方法中蕴含的物理思想，提高学生的创新能力。

(2) 通过物理实验课的教学活动，使学生掌握物理实验的基本知识、基本方法，增强学生的基本实验技能。这里所说的基本实验技能是指通过课前预习，能够编制出“操作程序”，独立做好实验的准备工作；能够对实验现象进行分析和判断；正确记录实验数据；正确处理实验数据，绘制图线和表格，撰写出有见解的实验报告；独立完成简单的设计性实验。

(3) 培养与提高学生的科学实验能力, 其中包括:

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, 做好实验前的准备。

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, 撰写合格的实验报告。

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

(4) 培养和提高学生的科学素养。包括严谨的工作作风, 理论联系实际和实事求是的科学态度, 主动探索的创新精神, 不怕困难、主动进取的探索精神, 遵守操作规程、遵守纪律和爱护国家财产的优良品德, 以及在实验过程中相互协作、共同探索的合作精神。

为达到这一培养目标, 学生应主动学习, 实验室需要提供完善的服务, 教师需要把教学和服务二者完满地融合在一起, 以取得最佳的教学效果。

四、如何学好物理实验课程

物理实验是学生在教师指导下独立进行的一种实践活动。实验课的教学安排不可能像书本教学那样, 使所有的学生按照同样的内容以同一进度进行。因此, 学习物理实验课就要求同学们投入较大的精力并且有较强的独立工作能力。学好物理实验课的关键在于把握以下三个基本环节:

1. 实验前的预习

做一个实验包括三个学习环节: 课前预习、课堂操作、课后撰写实验报告。课堂操作是最基本的环节, 撰写实验报告是实验成果的书面表达。预习是课堂操作的必要准备, 这一环节是必不可少的, 没有预习或没有完成预习报告是不允许进行实验操作的。课前预习应做好三件事, 一是阅读教材, 二是主动去熟悉仪器, 三是写出预习报告。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, 对于所涉及的测量仪器, 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: 实验名称, 实验目的, 实验原理, 实验内容与步骤, 画出数据记录表格, 绘出电路图、光路图或设备示意图。数据记录表格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或实验讲义上, 这种做法反映了实验者心态浮躁和不严谨, 很容易铸成大错, 在实验课堂上是不允许的。

2. 实验操作过程中应遵守的原则

(1) 实验时应遵守实验室规章制度。

仔细阅读有关仪器使用的注意事项或仪器说明书; 在教师指导下正确使用仪器, 注意爱

护实验设备，轻拿轻放，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。

(2) 实验仪器放置的位置必须合理。

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。

(3) 实验仪器必须处于良好的工作状态。

所有仪器必须调整到正确的位置和稳定的状态。在安装和调整仪器时，不得用书本、纸片和木块做垫块，因为这些物品本身就不稳定，容易造成测量数据的分散性，影响实验的质量。

(4) 及时发现和排除故障。

仪器在使用过程中难免发生故障，使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。

3. 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上按指示器的位置得到读数。读数时要注意以下几点：

(1) 有效数字取位要合理，要读到有误差的那一位。

(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；在用助视仪器读取线纹（谱线或条纹）的位置时，要将线纹的像调节到助视仪器的分划板平面上。

(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，不要迫不及待地记录读数，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。如果一时找不到原因，应及时报告指导教师。

4. 数据记录

做好实验数据的记录是科学实验的一项基本功。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。在观察、测量时，要做到正确读数，实事求是地记录客观现象和数据。

(1) 预习时设计好实验数据记录表，实验数据应记录在表格里。数据表应有表序和表题。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。表题是数据表的名称，表题应能确切表达数据表的特定内容，要避免使用泛指性词语，如“测量数据”“数据表”等。例如，测量一个长方体的体积，其数据表的表题可拟为“长方体的几何尺寸”。除记录实验数据外，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。

(2) 要直接记录原始数据。有些仪表的标尺没有直接给出测量结果，只给出了分度数，要想得到测量结果，需要换算，在这种情况下，应直接将分度数填入表中，不要先乘分度值，再将乘积填入表中，以防出错。换算的工作，可在操作完成以后再进行。

(3) 发现了错误的数据应及时改正，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，并在旁边写上正确的数据。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。

5. 分析实验

实验最后一般总会有数据结果，这些数据是否正确，靠什么去判断？数据的好坏又说明什么？实验结果是否正确？这些问题主要是靠分析实验本身来判断，即必须分析实验方法是否正确，它带来多大误差，仪器带来多大误差，实验环境有多大的影响等。实验后的讨论是发挥同学们才智、提高大家分析问题和解决问题能力的重要环节，应努力去做。但要注意，不要空发议论，应力求定量地分析问题，做到言之有据。往往有些学生，当实验数据和理论计算一致时，就会心满意足，简单地认为已经做好了这次实验；而一旦数据和计算差别较大，又会感到失望，抱怨仪器装置甚至拼凑数据，这两种态度都是实验课程学习和一切科学研究活动所不可取的。实际上，任何理论公式都是在一定理论上的抽象和简化，而客观现实和实验所处的环境要复杂得多，实验结果必然和理论公式有差异，问题在于差异的大小是否合理。所以不论数据好坏，都应逐步学会分析实验，找出成败的原因。

6. 误差与数据处理

这部分知识是物理实验必须掌握的特殊语言。实验做得好与差，两种方法测量同一物理量其结果是否一致，实验验证了还是没有验证理论等，不能凭感觉；而必须用实验数据和实验误差来判断。领悟并运用这种语言，才能真正置身于实验之中，亲身感受成功的喜悦和失败的困惑。

7. 实验结束

实验结束，要把测得的数据交给指导教师检查签字，对不合理的或者错误的实验结果，经分析后还要补做或重做。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。

8. 实验报告的书写

写实验报告的目的是为了培养和训练采用书面形式总结工作或报告科学成果的能力。报告是实验成果的文字报道，最起码应做到字迹清楚、文理通顺、图表正确、数据完备、结论正确。给人以清晰的思路、见解和新的启迪才算得上一份成功的报告。实验报告一般应写在专用的实验报告纸上，其内容包括实验名称、实验目的、实验仪器、实验原理、实验内容与步骤、数据记录、数据处理与结果分析以及讨论等几个部分。实验报告必须附有教师签字的原始数据记录才有效。

书写实验报告必须做到以下几点：

(1) “实验名称”和“实验目的”一般应与教材中提法一致。“实验仪器”应填写本次实

验所用的主体设备和主要配件。

(2)“实验原理”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)“实验内容与步骤”只要写出本实验要做的主要内容和做的先后顺序及部分关键性的调整方法和测量技巧(不是整个过程的详细描述,而是个人理解的简述,可简可详)。

(4)“数据记录与处理”中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。数据处理要求写出处理的主要过程、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或给出实验结论。

(5)“讨论”(包括回答思考题),一般内容不受限制,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,所以能反映实验者观察和分析能力的高低。思考题都是一些和本次实验相关的条件、方法变化及更深层次的探讨问题,应该仔细考虑并认真回答。

报告无疑应该按照自己的思路来写,特别受赞赏的是自身体会的经验之谈。总之,物理实验课有自己的特点和规律,要学好这门课程不是件容易的事情,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科学技术人才的基本素质。

第二章 误差理论基础知识与 实验数据处理

人类的一切生产活动都离不开测量。测量结果的质量如何，要用误差理论来计算和评定。误差越小，测量结果越接近真值，其质量越高，使用价值也越高。随着科学技术的进步，一些生产活动对测量误差的要求也越来越苛刻。例如，某些大型计算机的一张芯片上就有成千上万个元件，每个元件的定位精度不能超过一根发丝的 $1/10$ ，而一旦超过了这个限度，这张芯片就将报废。石油钻井的钻头，其形位误差必须控制在几个微米之内，否则将严重折损其使用寿命。在核医学技术中，用 Co-60 照射病灶，是为了杀灭癌细胞，若不足某一剂量，毫无疗效；若超过这一剂量，不仅不能杀灭癌细胞，反而会诱发癌细胞。在这一领域中，严格控制照射剂量的测量误差，成了人命关天的大事。

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，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。

长期以来，国际上、各部门间评定误差的方法各不相同，给科技成果的互相交流和利用带来极大的困难，也给国际贸易的平等互利带来障碍。1980年，国际计量局在征求各国意见的基础上，提出了《实验不确定度的说明建议书》INC-1 (1980)。1990年，我国国家技术监督局颁布了 JJF 1059—1999《测量不确定度的评定与表示》国家计量技术规范。本章以这两份文件为基础，根据《理工科大学物理实验课程教学基本要求》，对上述两份文件作了大量的简化而编写成的。本专科学学生通过学习，对一些简单的物理测量，能够顺利地进行数据处理和误差计算，从而能够撰写出合格的实验报告。

误差理论比较抽象，用到的数学工具较多，给低年级学生的学习带来一定的困难。为了克服这一困难，我们有意避开了一些数学推导，而突出物理图像的说明，并且从物理实验的教学需要出发，精选如下内容作为教学重点。在学习这些内容时，要着重理解这些概念的物理意义和使用方法，而不必深究它们之间在数学上的逻辑关系，这样学习就不会感到困难。学习的重点是：

- (1) 测量列的最佳值，测量列的标准差；
- (2) 常用实验仪器的允许误差；
- (3) 直接测量不确定度计算公式；
- (4) 间接测量不确定度传递公式；
- (5) 图解法、逐差法、最小二乘法回归一元线性方程；

- (6) 有效数字运算和取位规则;
- (7) 学会使用计算机进行数据处理。

第一节 测量与误差

测量：以确定某量为目的的一组操作称为测量。这组操作可能是一个简单的动作，也可能是一个复杂的过程。物理实验的学习目的之一就是掌握某些物理量的测量方法，并且能够独立设计出一些测量方法以完成某些简单的测量任务。

测量误差：由测量而得到的待求量的值称为测量结果，测量结果与真值之差称为测量误差。若测量结果为 x ，真值为 a ，则

$$\delta = x - a \quad (2.1.1)$$

称为绝对误差。绝对误差与真值之比

$$E = \frac{\delta}{a} \times 100\% \quad (2.1.2)$$

称为相对误差。真值是一个理想的概念，一般是不知道的，所以测量误差的值实际上也是不知道的。

一、误差分类

误差产生有多方面的因素，根据误差的基本性质和产生原因可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

1. 系统误差

在一定条件下，对同一物理量进行多次重复测量时，误差的大小和符号均保持不变；而当条件改变时，误差按某种确定的规律变化（如递增、递减、周期性变化等），这类误差称为系统误差。

系统误差的主要来源有以下几方面。

(1) 仪器误差：仪器的结构和标准不完善或使用不当引起的误差。例如，天平不等臂、分光计读数装置的偏心差、电表的示值与实际值不符等属于仪器缺陷，在使用时可采用适当测量方法加以消除。仪器设备安装调整不妥，不满足规定的使用状态，如不水平、不垂直、偏心、零点不准等使用不当的情况应尽量避免。

(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，单摆测重力加速度时所用公式的近似性；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、光照等仪器使用要求的环境条件不一致而引起的误差。

(4) 人员误差：由于实验者的不正确习惯所造成的误差。例如，用停表计时时，总是超

前或滞后；对仪表读数时总是偏向一方斜视等。

在一定条件下采用一定的方法，对误差取值的变化规律及其大小和符号均能确切掌握的一类系统误差称为已定系统误差；另外，对剩余的不能确切掌握误差取值的变化规律及其大小和符号，而仅可估算其最大误差范围的一类系统误差称为未定系统误差。

2. 随机误差

在测量过程中，即使尽力消除或减少一切明显的系统误差以后，在相同条件下重复测量同一物理量时，仍然不会得到完全相同的结果，其测量值分散在一定的范围内，所得误差时正时负，绝对值时大时小，不能预知且呈现无规则的起伏，这类误差称为随机误差。

随机误差的产生，一方面是由测量过程中一些随机的未能控制的可变因素或不确定的因素引起的。例如，人的感官灵敏度以及仪器精密度的限制，使平衡点确定不准或估读数有起伏；由于周围环境干扰而导致读数的微小变化，以及伴随测量而来的其他不可预测的随机因素的影响等。另一方面是由被测对象本身的不稳定性引起的。例如，加工零件或被测样品本身存在的微小差异，这时被测量量就没有明确的定义值，这也是引起随机误差的一个原因。

随机误差和系统误差并不存在绝对的界限，在一定条件下它们可以相互转化。例如，按一定基本尺寸制造的量块，存在制造误差，对某一具体量块而言，制造误差是一确定数值，可以认为是系统误差；但对一批量块而言，制造误差则属于随机误差。又如，测量对象的不均匀性（如小球直径、金属丝的直径等），既可以当做系统误差，又可以当做随机误差。有时系统误差和随机误差混在一起，也难以严格加以区分。例如，测量者使用仪器时的估读误差往往既包含系统误差，又包含随机误差，前者是指测量者读数时总是有偏大或偏小的倾向，后者是指测量者每次读数时偏大或偏小的程度互不相同。

3. 粗大误差

明显地歪曲了测量结果的误差称为粗大误差，它是由于实验者使用仪器的方法不正确引起的。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粗大误差。在实验测量中要极力避免过失差错，在处理数据时，应首先检出含有粗大误差的测量值，并将其剔除。

二、测量结果的定性评价

评价测量结果的好坏，常用精密度、正确度和准确度三个术语来描述，它们的含义各不相同。

(1) 精密度——表示测量数值集中的程度。反应随机误差的大小。

(2) 正确度——表示测量数值的平均值偏离真值的程度。反应系统误差的大小。

(3) 准确度——是对测量数值的精密度和正确度的综合评定。准确度高说明测量值比较集中而靠近真值，即测量的随机误差与系统误差都较小。

图 2.1.1 是用打靶时弹着点的情况为例说明这三个术语的意义。图 2.1.1 (a) 表示射击的精密度高，但正确度较差。图 2.1.1 (b) 表示射击的正确度高，但精密度较差。图 2.1.1 (c) 表示精密度和正确度都高，即准确度高。

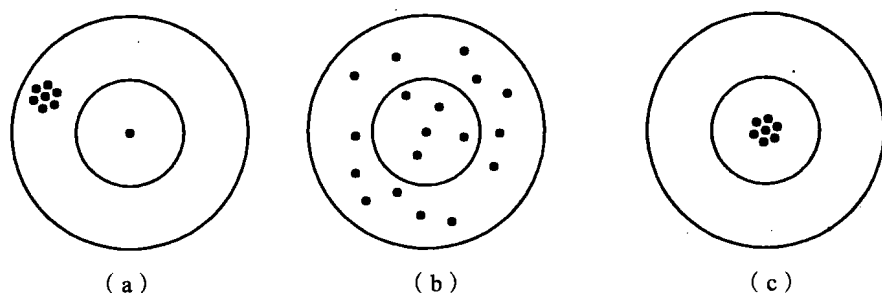


图 2.1.1 精密度、正确度、准确度示意图

精密度、正确度、准确度只是对测量结果做定性评价，一般不严格区分这“三度”，而泛称为“精度”。要对测量结果做定量评价，就必须定量地估算各误差的分量。

三、系统误差的处理

系统误差的特征有规律性，但缺乏显著性。因而我们不能依靠在相同条件下多次重复测量来发现它的存在，也不能借此来消除或是减小它的影响。在许多情况下，系统误差往往是影响测量结果准确度的主要因素。在实验中，我们应特别重视系统误差的分析。发现系统误差，估算它对结果的影响，尽可能设法修正、减小或消除它的影响。

(一) 系统误差的检查方法

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次序排列，观察其变化。若绝对误差不是随机变化而是规律性变化，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

分析实验依据的理论公式所要求的条件在实验测量过程中是否得到满足。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黏性摩擦阻力的作用会引起速度减小，如果实验中作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，单摆实验中，利用近似公式 $g = 4\pi^2 l / T^2$ 求 g ，测量结果也必然存在系统误差，因为该公式是将摆球理想化为一个质点，并假定摆球很小以及忽略空气阻力和浮力而得出的。

分析仪器要求的使用条件是否得到满足，实验不满足仪器的使用条件时也会产生系统误差。

3. 实践对比法

用不同的方法测量同一物理量，在随机误差允许的范围内观察结果是否一致。若不一致，则其中某种方法存在系统误差。

(1) 仪器对比：例如，用两个电表接入同一电路，对比两个表的读数，如果其中一个为标准表，就可得出另一个表的修正值。

(2) 改变测量条件进行对比：例如，电流正向与电流反向读数，在增加砝码过程与减少砝码过程中读数，观察结果是否一致。

(二) 系统误差的消除

1. 消除产生系统误差的根源

在明确了系统误差产生的原因后，应采取相应的方法在实验前进行消除，使它在实验过程中不再出现，是消除系统误差的有效方法。若系统误差的出现是由于仪器使用不当，就应该把仪器调整好，并按规定的使用条件使用；若误差来源于环境因素的影响，应排除这种环境因素；等等。

2. 用实验方法消除系统误差

若有些系统误差在实验前不能消除，在实验过程中，可采用适当的实验方法使系统误差互相抵消。

(1) 恒定系统误差的消除。

① 交换法：将测量中某些条件（如被测物的位置）互相交换，使产生系统误差的原因对测量结果产生相反的影响，从而抵消系统误差。例如，为了消除天平不等臂带来的系统误差，可将被测物与砝码互相交换位置后再测量一次，若第一次测量结果为 $x = \frac{l_1}{l_2} P$ ，被测物与砝码互换位置后测量结果为 $x = \frac{l_2}{l_1} P'$ ，将两次测量结果相乘后再开方得 $x = \sqrt{PP'}$ (P, P' 为两次测量的砝码质量)，这就消除了天平不等臂的系统误差。

② 替换法：在测量条件不变的情况下，用一个标准量去代替被测量，并调整标准量使仪器的示值不变，这样被测量就等于标准量的数值。由于在代替过程中，仪器的状态和示值都不变，故仪器的误差和其造成系统误差的因素对测量结果不产生影响。例如，用电桥测电阻时，将电桥调平衡后，用一标准电阻代替被测电阻接入桥路，此时仅调整标准电阻仍使电桥平衡，读出标准电阻的值，即为测量结果。

③ 抵消法：在实验过程中，可改变测量方法（如测量方向等）使两次测量中的误差符号相反，取平均值以消除系统误差。例如，在用霍尔元件测磁场的实验中，分别改变加在霍尔元件上的电流方向和外加磁场方向，以消除由于不等位等因素带来的附加电压。

(2) 周期性系统误差的消除。

用半周期偶数观测法可有效地消除周期性系统误差。即测得一个数据后，相隔半个周期再测量一个数据，只要观测次数为偶数，取其平均值，就可以消除周期性系统误差对测量结果的影响。例如，在光学实验中，用分光计测角度时，为了消除轴偏心所带来的系统误差，而采用相隔 180° 的一对游标读数。

3. 系统误差的修正和估计

对于在实验前和实验过程中没有得到消除的已定系统误差，应在测量结果中进行修正。

例如，用伏安法测电阻时，如图 2.1.2 所示，测量值为 $R'_x = \frac{U}{I}$ ，若考虑电流表内阻 R_a 的影响，