



普通高等教育“十三五”规划教材

新编大学物理实验

(第三版)

主编 罗晓琴 罗 浩



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

新编大学物理实验

(第三版)

主编 罗晓琴 罗 浩

贵州师范学院内部使用

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是为贯彻落实教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会在2010年提出的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》而编写的；在第二版(2013年版)基础上改编了知识结构体系，增加了专业大类实验章节，既突出对学生基本能力的训练及对科学思维、科学方法、科学精神和创新能力的培养，又特别注意基础物理实验与专业特色之间的紧密结合，使得物理实验教学密切联系工程实际，可大幅提升学生的学习兴趣和工程实践能力。本书内容涵盖绪论、测量误差与数据处理、基础性实验、专业大类实验、综合设计性实验、开放性实验，共5章，44个独立实验和13个仿真演示实验。

本书还集中体现了功能模块化物理实验教学方法，可作为普通高等工院校、综合大学和师范类院校非物理专业的物理实验教材，也可供相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

新编大学物理实验 / 罗晓琴, 罗浩主编. —3版. —北京: 科学出版社, 2019.6

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-03-061619-7

I. ①新… II. ①罗… ②罗… 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(2019)第115076号

责任编辑: 窦京涛 / 责任校对: 杨聪敏

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 华路天然工作室

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>

天津文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年7月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019年6月第 三 版 印张: 21 1/2

2019年6月第十次印刷 字数: 433 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《新编大学物理实验（第三版）》
编委会

主 编	罗晓琴	罗 浩		
副主编	万 伟	邓先金	谢英英	
参 编	赵福海	马婷婷	毛雪丽	周 磊
	陈喜芳	林洪文	施鹏程	张海军
	毛祥庆			

前 言

本书是根据教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会在 2010 年提出的《理工种类大学物理实验课程教学基本要求》，按照教育部“高等学校基础课实验教学示范中心建设标准”，结合我校具体情况与专业特点、实验室仪器设备情况和教学实践，在不断探索高等教育改革与总结经验基础上，对 2013 年由科学出版社出版的《新编大学物理实验(第二版)》修订而来。

本书以学生为中心，突出对学生基本能力的训练和对学生创新思维、创新方法、创新能力的培养；从基础性实验出发，以专业大类实验为拓展，以综合性实验、设计性实验、开放性实验训练递进；在基础性实验中贯穿功能模块化物理实验教学方法。功能模块化是指按同一物理现象(原理)观测(验证)的多种方法和同一物理方法多种应用的一组实验组成功能模块。该方法的施行，既能使学生的实验基本技能得到全面训练，又能使学生在校期间科研素养得到一定的提升。本书还创新性地增加了专业大类实验，根据本校特色引入了专业大类实验，将基础物理实验与专业特色更加紧密地结合，使得物理实验教学更加紧密联系工程实际，从而提升学生的学习兴趣 and 工程实验能力。

本书第 2 章是基础性实验，主要包括力学、热学、声学、电学、磁学、光学和近代物理的 10 个实验；第 3 章是专业大类实验，主要包括各专业大类共 26 个实验；第 4 章是综合设计性实验，主要包括微小长度的测量、光学介质折射率的测定及应用等 8 个实验；第 5 章是开放性实验，主要包括一系列仿真实验和演示实验。同时在每部分有理论知识介绍、实验背景、实验过程注意事项、思考题和综合模拟题等。本书主要针对 48 学时和 32 学时的理工科基础物理实验课程开设，也可以作为文科物理实验和专科学生的素质课程。

本书由罗晓琴和罗浩担任主编，万伟、邓先金、谢英英担任副主编。参编人员有赵福海、马婷婷、毛雪丽等。其中前言由罗浩负责编写，绪论由罗晓琴负责编写，第 1 章由万伟负责编写，第 2 章由罗晓琴、谢英英、赵福海、邓先金和万伟负责编写，第 3 章由罗浩、谢英英、毛雪丽、万伟和马婷婷负责编写，第 4 章由赵福海负责编写，第 5 章由马婷婷负责编写，练习题和附录等由罗晓琴负责编

写. 最后由万伟、邓先金、谢英英负责整理, 罗晓琴和罗浩负责统稿和审核. 本书在编写过程中得到周磊、陈喜芳、林洪文、施鹏程、张海军和毛祥庆的大力支持, 在此表示感谢.

由于编者水平有限, 书中不妥之处在所难免, 敬请读者批评指正.

四川省物理基础课实验教学示范中心教材编写组

2018 年 10 月于中国科技城·绵阳

目 录

前言	
绪论	1
第 1 章 测量误差与数据处理	6
1.1 测量与误差	7
1.2 误差的分类	10
1.3 测量结果和评定标准不确定度	14
1.4 有效数字及其运算法则	24
1.5 数据处理	27
1.6 常用计算机数据处理及作图软件	35
1.7 用计算器进行实验数据处理	37
第 2 章 基础性实验	40
实验 2.1 长度的测量	40
实验 2.2 固体密度的测量	49
实验 2.3 力敏传感器测液体表面张力系数	55
实验 2.4 示波器的使用	62
实验 2.5 用惠斯通电桥测电阻	68
实验 2.6 电表改装与校准	77
实验 2.7 分光计的调整与使用	86
实验 2.8 三棱镜折射率的测定	93
实验 2.9 等厚干涉	98
实验 2.10 迈克耳孙干涉仪测 He-Ne 激光的波长	104
第 3 章 专业大类实验	113
实验 3.1 非线性电阻的伏安特性测量	113
实验 3.2 电势差计的使用	117
实验 3.3 静电场的测绘	122
实验 3.4 霍尔效应法测量磁场	130
实验 3.5 交流电桥	137
实验 3.6 双臂电桥原理及应用	141
实验 3.7 落球法测定液体的黏度	147

实验 3.8 刚体转动惯量的测定	155
实验 3.9 三线摆法测试物体的转动惯量	162
实验 3.10 金属线膨胀系数的测量	167
实验 3.11 用玻尔共振仪研究受迫振动	172
实验 3.12 温度传感器的测量	182
实验 3.13 声速的测量	187
实验 3.14 杨氏模量的测定	195
实验 3.15 用旋光仪测旋光性溶液的旋光率和浓度	203
实验 3.16 材料的热物性实验	209
实验 3.17 热的传导及导热系数测定的研究	214
实验 3.18 用焦利秤测液体表面张力系数	217
实验 3.19 用冲击法测磁场	223
实验 3.20 光电效应测定普朗克常量	226
实验 3.21 光栅衍射测波长	233
实验 3.22 光的偏振	237
实验 3.23 薄透镜焦距的测定	244
实验 3.24 弗兰克-赫兹实验	251
实验 3.25 利用塞曼效应测定电子荷质比	257
实验 3.26 密立根油滴实验	266
第 4 章 综合设计性实验	274
实验 4.1 微小长度的测量	277
实验 4.2 振动的研究	277
实验 4.3 变阻器在电路中的使用和研究	278
实验 4.4 电势差计的多功能应用	279
实验 4.5 自组望远镜和显微镜	280
实验 4.6 光栅常数的测定及光栅特性的研究	280
实验 4.7 光的偏振性及应用的研究	281
实验 4.8 光学介质折射率的测定及应用	282
第 5 章 开放性实验	283
5.1 仿真实验	283
5.2 演示实验	296
参考文献	316
附录 1 中华人民共和国法定计量单位	317
附录 2 物理实验常数表	320

模拟练习试题一	324
模拟练习试题二	326
模拟练习试题三	330

绪 论

物理学是一门实验科学,在物理学的建立和发展中,物理实验起到了直接的推动作用.从经典物理到近代、现代物理,物理实验在发现新事物、建立新规律、检验理论、测量物理量等诸多方面发挥着巨大作用.随着现代科学技术水平的高度发展,物理实验的思想、方法、技术与装置已广泛地渗透到了自然学科和工程技术的各个领域,解决了很多生产和科研问题.

大学物理实验是一门重要的基础课程,是学生进入大学后系统接受科学实验方法和实验技能训练的开端.通过学习,可以提高学生用实验手段发现、分析和解决问题的能力,激发学生的创新意识和创造力,培养和增强学生独立开展科学研究的素质.

一、大学物理实验的地位和作用

科学的理论来源于科学的实验,并受到科学实验的检验.物理学的理论就是通过观察、实验、抽象、假说等研究方法,并通过实验的检验而建立起来的.

观察和实验是物理学中的重要研究方法.观察就是对自然界中发生的某种现象,在不改变自然条件的情况下,按照原来的样子加以观察研究;而实验则是人们按照一定的研究目的,借助规定的仪器设备,人为地控制或模拟自然现象,使自然现象以比较纯粹或典型的形式表现出来,进而对其进行反复观察和测试,探索其内部规律的一种方法.

物理学从本质上说是一门实验科学,无论是物理规律的发现,还是物理理论的验证,都有待于实验.

物理实验不仅在物理学的发展中占有重要的地位,而且在推动其他自然科学、工程技术的发展中也起着重要作用.特别在不少交叉学科中,物理实验的构思、方法和技术与化学、生物学、天文学等学科的相互结合已取得丰硕的成果.此外,物理实验还是众多高技术发展的源泉,如原子能、半导体、激光、超导和空间技术等最新科技成果,都是与物理实验密切相关的.

二、大学物理实验课的主要任务

(1) 通过对实验现象的观察分析和对物理量的测量,使学生掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能.运用物理学原理和物理实验方法研究物理规律,加深对物理学原理的理解.

(2) 培养与提高学生从事科学实验的能力,主要包括:

① 自学能力.能够自行阅读实验教材与参考资料,正确理解实验内容,做好实验前的准备工作.

② 动手能力.能借助教材与仪器说明书,正确调整和使用仪器,制作样品,发现和排除故障.

③ 思维判断能力.运用物理学理论,对实验现象与结果进行分析和判断.

④ 书面表达能力.能够正确记录和处理实验数据,绘制图表,分析实验结果,撰写规范、合格的实验报告或总结报告.

⑤ 综合运用能力.能够将多种实验方法、实验仪器结合在一起,运用经典与现代测量技术和手段,完成某项实验任务.

⑥ 初步的实验设计能力.根据课题要求,能够确定实验方法和条件,合理选择、搭配仪器,拟定具体的实施步骤.

(3) 培养学生从事科学实验的素质,包括理论联系实际、实事求是的科学作风;严肃认真的工作态度;不怕困难、勇于探索的创新精神;遵章守纪、爱护公物的优良品德;团结协作、共同进取的作风.

三、大学物理实验课的基本程序和要求

1. 实验预约

目前,大学物理实验课程大多采用开放式的教学方式,即学生可在物理实验中心提供的上课时间和开设的实验项目内,根据自己的专业特点、兴趣爱好及时间安排,自行选择实验项目和实验时间.因此,做好上课前的预约工作是至关重要的.实验预约主要通过计算机网络实现,学生在预约时应仔细阅读学校教务处选课系统及大学物理实验中心关于开放实验的有关管理规定和预约指南,合理地安排好自己的实验课表,保证实验课的顺利进行.

2. 实验前的预习

预习是训练和提高自学能力的极好途径,为了在规定时间内高质量地完成实

验内容,必须做好预习工作.预习时,通过阅读实验教材及参考资料,重点考虑三个方面的问题:做什么(最终目的);根据什么去做(实验原理和方法);怎样做(实验方案、条件、步骤和关键要领).在此基础上写好预习报告,报告的主要内容是:实验名称,简单实验原理(如主要计算公式、线路图等),实验内容(需观察的现象或需测量的物理量,数据记录表格),遇到的问题及注意事项.每次实验前,教师应检查预习情况.

3. 实验操作

实验时应严格遵守实验室的规章制度.在实验正式进行前,首先结合仪器实物,对照实验讲义或仪器说明书,认识和熟悉仪器的结构和使用方法;其次要全面考虑实验的操作程序,怎样做更为合理,不要急于动手.因为对于操作程序中某些关键步骤而言,哪怕是很小的错误,都有可能使实验前功尽弃.

仪器的安装和调整是决定实验成败的关键一环,使用仪器进行测量时,必须满足仪器的正常工作条件.

实验测量应遵循“先定性、后定量”的原则,即先定性地观察实验全过程,确认整个实验装置工作是否正常,对所测内容要做到心中有数.在可能的情况下,对数据的数量级和趋势做出估计后,再定量地读取和记录测量数据;测量时,观测者应集中精力、细心操作、仔细观察,并积极发挥主观能动性,以获得所用仪器可能达到的最佳效果.

原始数据是宝贵的第一手资料,是以后计算和分析问题的依据,要按有效数字的规则正确记录.

实验记录的内容应包括:日期、时间、地点、指导教师、仪器的名称和编号、原始数据及有关现象.

实验数据是否合理,学生应首先自查,然后交给指导老师审查.对不合理的和错误的实验结果,应分析原因,及时补测或重做.离开实验室前,应听从实验管理员和指导老师的指挥,自觉整理好仪器,并做好清洁工作.

4. 实验后的报告

实验报告是一次实验的总结.由于实验是有目的和要求的,作为总结的报告,要对实验目的和要求给以回答.

报告的基本内容有:①目的;②理论依据;③仪器和用具;④实施实验的步骤;⑤记录;⑥数据处理;⑦结果与分析;⑧实验后的思考.

写实验报告也是学习的过程,绝不是抄写记录和计算结果,而是要思索,在思索中提高科学素养,增强独立进行实验的能力.

以下几点对写好报告有参考作用.

1) 标准不确定度的分析

测量不确定度的分析与计算是实验工作的重要方面. 计算标准不确定度的意义在于:

(1) 可以正确评定测量的质量.

(2) 从各来源的不确定度分量,说明测量有待改进的重点.

(3) 从由仪器引入的不确定度和由非仪器引入的不确定度的比较,说明仪器配置是否合理.

(4) 增强分析不确定度的能力,这对以后独立进行实验、预测不确定度是有利的基础.

2) 测量结果的评价

在实际工作中,对测量的质量总是有要求的,如实验要求相对不确定度不能大于百分之几. 在学生实验中往往不明确提出具体的质量指标,这时如何评价测量的质量呢?

(1) 计算标准不确定度和相对不确定度. 如果总的标准不确定度不是明显大于仪器的不确定度,就可以认为测量达到了仪器可以达到的精度.

(2) 测量结果(y)和其公认值(标准值) A_y 相差不超过其标准不确定度 $u(y)$ 的 3 倍,即

$$|y - A_y| \leq 3u(y)$$

则可以认为测量结果和公认值在测量误差范围内是一致的.

(3) 当 $|y - A_y| > 3u(y)$ 时,可能是: ①测量有错误; ②存在未发现的比较大的不确定度来源; ③实验原理或仪器有问题; ④ A_y 作为 y 的近似真值是不合适的,即 y 不可与 A_y 进行比较.

经分析,重复测量或调整实验去探索问题的所在.

(4) 实际工作中的测量一般是面对未知的,因为如果已知,就不必测量了. 我们在不断地学习中,做各种测量和分析,提高测量与分析的准确性,从而对自己的测量结果和标准不确定度计算越来越有信心. 实验报告不仅是针对一个实验,而是和我们的科学素质的提高密切相关的.

3) 分析与思考

实验后可供思考的问题很多,例如:

(1) 实验中遇到的困难的处理.

(2) 实验设计的特点是什么,普遍意义何在?

例如,用单摆测重力加速度的实验,实验设计并不复杂,但是在测量设计上有很多巧妙之处.重力加速度之值较大,从下落运动难以测准,而作为单摆,它使加速度由 g 变成 $g \sin \theta$,而 $\sin \theta$ 很小,所以单摆运动的加速度较小,振动较慢,容易测出振动周期;又单摆将落下的单向运动变成等周期的往复运动,测量 n 个周期 T 的时间 $t = nT$,可减小测量误差,提高测量的准确度.再有,使用铁球为摆锤,由于铁的密度远大于空气的密度,因此空气浮力引入的误差将大大减小.

(3) 对实验设计改进的设想和问题.

(4) 对实验中出现的异常现象的分析与判断,等等.

学生实验一般是按指定的方法,使用指定的仪器进行的.由于实验方法与仪器是经仔细设计和反复实验检验过的,一般均可获得较好的结果.对于学生实验,虽然希望有好的结果,但从根本上讲,重要的不是结果如何好,而是对实验设计的认识,这才是实验全过程对学生的锻炼.

第1章 测量误差与数据处理

人类认识自然离不开观察和测量. 在物理实验中对自然界的物理现象或人工再现的物质运动形态的研究, 不仅需要定性的观察, 更需要定量的测量, 以探索各物理量之间的定量关系, 从而验证理论或发现规律.

测量是为确定被测对象的量值而进行的被测量与同类标准量(量具或仪器)相比较的过程. 因此, 为进行测量, 必须具备测量对象、测量单位、测量方法和测量准确度等四大要素. 测量的读数是被测量与计量单位的比值, 测量数据(被测量量值)则必须包含测量值的大小和测量单位, 二者缺一不可.

根据测量方法, 测量可分为直接测量与间接测量.

直接测量是把待测量与标准量直接比较得出结果, 例如, 用米尺测量物体的长度, 用天平称物体的质量, 用电表测电流等.

间接测量是借助于函数关系由直接测量的结果计算出所要求的物理量. 例如, 立方体的长(L)、宽(D)、高(H)由直接测量得出, 而其体积则由公式 $V = L \cdot D \cdot H$ 计算得出, 这就是间接测量.

在物理实验中有直接测量和间接测量, 但大量的是间接测量. 因为在某些情况下, 直接测量比较复杂或者测量精度不高, 而另一些情况下直接测量无法实现.

根据测量条件, 测量可分为等精度测量与非等精度测量. 等精度测量是指在同一(相同)条件下对同一待测量进行的多次测量. 例如, 同一个人, 用同一个仪器, 每次测量的环境条件均相同. 等精度测量, 每次测量的可靠程度相同. 若每次测量的条件不同, 或测量仪器, 或测量方法改变, 这样进行的一系列测量叫非等精度测量. 显然非等精度测量, 每次测量的可靠程度也不相同. 物理实验中大多数采用等精度测量.

测量仪器是指用以直接或间接测出被测对象量值所用的器具, 如游标卡尺、天平、停表、电表、分光计等.

测量结果给出被测量的量值, 包括两部分, 即数值和单位. (不标出单位的数值不是量值!)

一个国家的最准确的计量器具是一些主基准, 在全国各地则有由主基准校准过的工作基准, 实验室使用的仪器已直接或间接用工作基准进行校准过.

仪器的准确度等级在测量时是以仪器为标准进行比较的, 当然要求仪器准确. 不过由于测量的目的不同, 对仪器准确程度的要求也不同, 如称量金戒指的天平

必须准确到 0.001g, 而粮店卖粮的台秤差几克都是无关紧要的. 为了适应各种测量对仪器准确程度的不同要求, 国家规定工厂生产的仪器分为若干准确度等级. 各类各等级的仪器, 又有对准确程度的具体规定. 例如, 1 级螺旋测微器, 测量范围小于 50mm, 最大误差不超过 $\pm 0.004\text{mm}$; 又如, 1.0 级电流表, 测量范围为 0~500mA 的最大误差不超过 $\pm 5\text{mA}$.

实验时要恰当地选取仪器. 仪器使用不当对仪器和实验均不利. 表示仪器的性能有许多指标, 其中最基本的是测量范围和准确度等级. 当被测量超过仪器原测量范围时, 首先会对仪器造成损伤, 其次可能测不出量值(如电流表), 或勉强测出(如天平), 但误差将增大. 对仪器原准确度等级的选择也要适当, 一般是在满足测量要求的条件下, 尽量选用准确程度低的仪器. 减少准确度高的仪器的使用次数, 可以减少在反复使用时的损耗, 延长其使用寿命.

1.1 测量与误差

1.1.1 测量的目的

测量的目的是确定被测量的量值大小. 被测量在一定时间、一定空间环境条件下, 存在着不以人的意志为转移的真实大小, 称此值为被测量的真值 x_0 . 测量的理想结果是真值, 但是由于诸多因素影响, 真值是不能确知的, 因为:

(1) 被测量的数值形式与标准量的比常常是不可通约的(不能以有限位数表示).

(2) 人类认识能力的不足和科学技术水平的限制, 如测量仪器只能准确到一定程度; 测量的理论和方法不完备, 具有近似性; 观测者的操作和读数不准确; 环境条件的影响等.

因而测得值和真值总是不一致的, 即测量结果都具有误差, 误差自始至终存在于一切科学实验和测量过程之中, 此称为误差公理.

为了衡量和表示误差的大小, 规定测得值 x 减去真值 x_0 为测得值的误差 δ , 即

$$\delta = x - x_0 \quad (1.1.1)$$

误差 δ 也称为绝对误差, 是一个与测得值和真值具有相同单位的数据, 且为一代数. 当 $x \geq x_0$ 时, $\delta \geq 0$; $x < x_0$ 时, $\delta < 0$.

一般说来, 真值是理想的概念, 是不能确知的, 因而测得值的误差也不能确知. 但是在某些情况下真值是可行的, 而在另一些情况下从相对意义上说也是可行的.

真值可行和相对可行的情况如下.

(1) 理论真值: 如平面三角形三内角之和恒为 180° ; 理想电容和电感上, 其电压和电流的相位差为 90° ; 此外, 还有理论设计值和理论公式表达值等.

(2) 计量学约定真值: 由国际计量大会决议规定的基本物理量的计量标准, 如长度单位——米(m)是光在真空中在 $1/299792458$ s 的时间间隔内行程的长度.

(3) 标准器相对真值: 高一级标准器的误差与低一级标准器或普通计量仪器的误差相比, 为其 $1/5$ (或 $1/3 \sim 1/20$) 时, 则可认为前者是后者的相对真值. 例如, 一个高稳定度晶体振荡器输出的频率相对于普通频率计的频率而言是真值.

(4) 近似真值(近真值)——最佳估计值: 直接测量时若不需要对被测量进行系统误差的修正, 一般就取多次测量的算术平均值 $\bar{x}$ 作为近真值, 即 $\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n)$, 实验中有时只需测一次或只能测一次, 该次测量值就为被测量的近真值. 若要求对被测量进行已定系统误差的修正, 通常是将已定系统差(即绝对值和符号都确定的可估计出的误差分量)从算术平均值 $\bar{x}$ 或一次测量值中减去, 从而求得被修正后的直接测量结果的近真值. 例如, 螺旋测微器测长度时, 从被测量结果中减去螺旋测微器的零差. 在间接测量中, 近真值 $\bar{N}$ 即为被测量的计算值, $\bar{N} = F(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \cdots)$.

同一被测量, 在相同的环境条件下, 采用当今最精确的方法和最高精度的仪器经多次测量所得结果, 且为科技界公认的值, 也作为一般测量的真值, 如在标准大气压下 4°C 的水的密度 $\rho_{\text{公认}} = 0.999973\text{g/cm}^3 \approx 1\text{g/cm}^3$, He-Ne 激光器橙色光波的波长 $\lambda_{\text{公认}} = 632.8\mu\text{m}$.

以上所述约定真值、近真值、公认值等, 有的文献统称为约定真值.

1.1.2 测量的任务

基于以上理由, 测量的任务是:

- (1) 给出被测量真值的最佳估计值.
- (2) 给出真值最佳估计值的可靠程度的估计.

最佳估计值是误差比较小的测量结果, 为了减少误差就必须分析误差的来源以便采取相应对策. 实际上任何测量的误差都是多种因素引入的综合效应, 现以单摆测重力加速度实验为例进行分析.

理想的单摆模型是悬线质量为零、无弹性, 摆锤为无大小的质点. 摆角接近于零, 则摆长 l 和周期 T 之间满足关系 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, 其中 g 为当地的重力加速度.

用实际的单摆测重力加速度时, 误差来源大致为以下几方面:

- (1) 测量仪器, 如米尺和停表不准确.
- (2) 对仪器的操作和读数不准确.