



普通高等教育“十二五”规划教材
面向21世纪物理学课程与教学改革系列教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

赵维义 主编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
面向 21 世纪物理学课程与教学改革系列教材

大学物理实验

赵维义 主编

科学出版社

北 京

版权所有，侵权必究

举报电话：010-64030229；010-64034315；13501151303

内 容 简 介

本书根据教育部《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)，结合理工院校专业设置和实验室一般情况，在多年教学实践的基础上编写而成。主要内容包括实验基础理论和30个物理实验。

实验基础理论中给出了实验数据处理中必须用到的计算公式，同时专门介绍了有关随机误差的概论统计分析理论，为任课老师和有兴趣的学生提供参考资料。实验中安排了实验目的、仪器用具、实验原理、实验内容、数据处理等实验相关内容，并在每个实验的后面安排了思考题，以提高学生对实验的掌握程度。同时为了区分物理原理(理论或概念)与实验原理，在某些实验中，将与实验技术、实验方法、实验仪器设备无直接联系的物理定律、定理等物理概念单独列为相关物理概念进行讲解，突出有关物理知识。在实验原理中，则着重讲解与实验技术、方法及设备相关的实验设计思想和实现方案，突出实验技能方面的知识。

本书注重实验原理，教学实践性强，讲究开放式实验教学，是一本理想的理工科大学物理实验教材，也是相关教学、研究和实际工作者的参考读物和实验指南。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/赵维义主编. —北京：科学出版社，2011.7

普通高等教育“十二五”规划教材. 面向21世纪物理学课程与教学改革系列教材

ISBN 978-7-03-031841-1

I. 大… II. 赵… III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. 04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第137872号

责任编辑：李磊东 / 责任校对：蔡 莹

责任印制：彭 超 / 封面设计：苏 波

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>

武汉市新华印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年7月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2011年7月第一次印刷 印张：16 3/4

印数：1—5 000 字数：384 000

定价：32.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前 言

物理实验是一门独立的基础课程,它与大学物理理论课在教学内容上存在若即若离关系;在教学方法和处理问题方式上与理论课教学差别很大;大部分实验项目都涉及多学科领域的知识以及众多仪器、设备。这些对于首次接触到实践教学环节的大学一年级学生来说,确实存在着诸多的困难与不适应。我们深深意识到,如何完成好作为实践教学环节的先行基础课程的大大学物理实验课的教学,除了在教学方法、教学艺术上的不断改革与创新外,实验教材同样起着重要的作用。本教材正是在紧扣教育部制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》的基础上,特别考虑到大学一年级学生在物理概念上的模糊与不足,在实验技能与实验基础知识方面的近乎空白的欠缺这一具体情况编写的。

按照《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》的精神,物理实验课的主要任务是培养严谨的科学态度和工作作风;提高动手能力与实验技能;学习科学巧妙的实验设计思想与实验方法;激发敏锐的科学思维与创新意识。基于此,本教材试图努力突出与这些要求相关内容的介绍与训练。顺利而正确的科学实验,必须有正确的科学理论为指导。因此,为了提高有关训练的效果,对于某些有利于能力训练、但尚未学到有关物理概念的实验项目,有必要对有关的物理概念做系统、准确的简要介绍。此外,为了区分物理原理(理论或概念)与实验原理,在某些实验中,将与实验技术、实验方法、实验仪器设备无直接联系的物理定律、定理等物理概念单独列为相关物理概念进行讲解,突出有关物理知识。在实验原理中,着重讲解与实验技术、方法及设备相关的实验设计思想和实现方案,以突出实验技能方面的知识。

完整的实验基础理论涉及较多的概率论知识,对于一年级的大学来说难度较大,本教材一方面从初级应用角度出发,经过简单的概述后,给出一些在数据处理中必须要用到的计算公式,同时专门用一节的篇幅系统介绍有关随机误差概念的统计理论,为任课教师和有兴趣的学生提供参考资料。

本书共包括 30 个实验,实验项目的编排,仍按通行的三层次结构,即分为基本技能训练实验;综合技能训练实验;近代物理与提高性实验三部分。在第一层次中尽量选择那些物理概念在高中阶段已经接触过的实验项目,使学生在理解实验的物理原理上不至于感到困难,可以将主要精力集中在基本实验技能训练、主要实验方法学习和对实验基础理论知识的掌握和运用上。

此外,本教材还有意识地进行一些归类化处理:① 将用不同方法测量同一个物理量的实验内容归到一个实验项目中;② 将用同一种方法测量不同物理量的实验内容归到一个实验项目中;③ 将用同一种实验仪器所作的实验内容合并到一个实验项目中。这样做,学生会在预习的过程中看到该实验项目中的全部内容,可以有效地拓展学生的想象与思维,避免使学生的实验学习出现僵化与教条。教学中,可以根据学生的具体情况及学时安排选择其中的部分内容。

彭玉平负责编写了部分实验项目并绘制或修改了全书绝大部分附图,朱小飞负责全书的校检工作。张琳、姜大华、郭凤岐、袁观宇等教授根据多年实践教学的经验与亲身体会,对本书的编写给出了许多宝贵的意见与建议,在此表示由衷的感谢。

本书的编写,参考了一些兄弟院校的实验教材,在这里一并表示感谢。

编 者

2011年5月

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 实验基础理论

第一章 测量误差与测量结果的不确定度	7
第一节 测量与有效数字	7
第二节 测量误差及其分类	8
第三节 测量结果的表达与不确定度	13
习题一	15
第二章 测量不确定度的计算(或估计)方法	16
第一节 直接测量结果的不确定度的计算(或估计)方法	16
第二节 间接测量结果的不确定度的计算(或估计)方法	18
习题二	21
第三章 常用实验数据处理方法	23
第一节 列表法	23
第二节 逐差法	24
第三节 作图法	26
第四节 线性拟合——最小二乘法	29
习题三	30
第四章 随机误差的统计分析	31
第一节 随机误差的评价	31
第二节 算术平均值和最小二乘法原理	31
第三节 函数的误差	34
第四节 测量值和平均值的标准偏差	35

第二篇 基本技能训练实验

实验 1 测量刚体的转动惯量	39
第一节 刚体的定轴转动	39

第二节 用扭摆法测量刚体的转动惯量	41
第三节 用三线摆法测量刚体的转动惯量	46
实验 2 光杠杆及其应用	53
第一节 光杠杆及其光学放大原理	53
第二节 用光杠杆测定金属的线膨胀系数	54
第三节 用光杠杆测定金属的杨氏模量	57
实验 3 用落球法测量液体的黏滞系数	63
实验 4 示波器的使用	67
参读材料 双踪示波器的使用说明	73
实验 5 直流电路基本实验	76
参读材料 直流电路实验基本仪器	79
实验 6 用补偿法测电子元件伏安特性	86
实验 7 平衡直流电桥及其应用	90
实验 8 薄透镜焦距的测定	95
实验 9 分光计的调节与应用	99
第一节 分光计的调节	99
第二节 用分光计测三棱镜的顶角和折射率	103
第三节 衍射光栅与光波波长测量	107
实验 10 用电子积分器测量螺线管轴向磁场	112
参读材料 JCC-1 型静态磁参数测试仪简介	117

第三篇 综合技能训练实验

实验 11 动态法测定材料的杨氏模量	121
实验 12 声速的测量	126
实验 13 用补偿法测电源的电动势	132
实验 14 RC 串联电路的暂态过程	136
实验 15 霍尔效应及其应用	141
实验 16 非平衡直流电桥及其应用	148
实验 17 等厚干涉及其应用	152
实验 18 平行光管的调节和应用	158
实验 19 光的偏振	164
参读材料 同频率相互垂直振动的合成	170

实验 20 激光全息照相	174
参读材料 暗室操作过程	181

第四篇 近代物理与提高性实验

实验 21 光电效应与普朗克常数测定	185
实验 22 用玻尔共振仪研究受迫振动	192
实验 23 用纵向磁聚焦法测定电子荷质比	199
实验 24 弗兰克-赫兹实验	204
实验 25 用准静态法研究铁磁材料磁化特性	210
实验 26 密立根油滴实验	219
实验 27 核磁共振	225
实验 28 光拍法测量光的速度	230
实验 29 用电子积分器测电容	240
实验 30 交流电桥	243
附录 A 基本常数表	246
附录 B 国际单位制简介	248
附录 C 常用物理量数据表	250

绪 论

一、物理实验的性质和目的

物理实验是科学实验的一个分支,物理实验的任务集中在测量物理量的量值及其在一定条件下的变化规律和研究与建立物质的运动规律两个方面。

大学物理实验是大学中实践教学环节的第一门课,其主要目的是训练学生的科学实验能力与提高学生的科学实验素质,以便使学生具备独立进行科学实践活动的基础知识与基本技能;通过实验过程学习一些尚未学到的物理知识和加深对已学到的物理知识的理解;同时了解一些最新的科学发展前沿。科学实验能力可以归纳为如下几个方面:自学能力(从而能不断获取新的知识);动手能力;分析解决问题的能力;安装调试仪器的能力;排除故障的能力;文字表达能力;归纳综合能力;设计创新能力;科学想象能力等。科学实验素质包括:理论联系实际和实事求是的科学作风;严谨踏实、认真细致的工作态度;遵守纪律、爱护公物的良好品格;善于思考,主动探究的钻研精神等。能力与素质两者同时兼备,才能在科学研究中取得重大成功。

二、物理实验的地位和作用

大学物理实验是高等教育中的一门独立基础课程,是一门必修课。

物理学是一切自然科学的基础,物理学是一门实验科学,物理实验在物理学理论体系的建立和发展中一直起着十分重要的作用。大学物理实验课的作用远不止于物理学本身,其中既有对诸多物理规律的深入认识,又有对认识事物规律的各种方法、手段与技术的全面、系统的学习。大学物理实验在锻炼能力、培养素质方面是任何其他实践教学活动中所不可取代的。

大学物理实验是大学阶段所有实验课的先行课,各种有关实验活动的基础理论、基本规则、基本技能等都要在此课程中进行学习和接受训练。

三、物理实验的特点

1. 科学性

理论是科学,实验同样是科学,这可以从以下几方面来理解。首先,要求实验工作者必须充分尊重事实,来不得半点虚假,否则,必然出现谬误;其次,对实验数据的处理,是完全按照科学方法进行的,尤其对随机现象的处理,则是以成熟而系统的概率统计理论为准的,因而是科学的而不是随意的。

2. 实践性

实验是实践活动,实践活动与理论工作不同,理论工作可以而且往往都对问题加以抽

象化、理想化,忽略一些暂时认为不重要的因素。而做实验的时候,情况则恰恰相反,必须充分考虑到各种实际情况,得出的结论要尽量符合实际;符合做实验的环境的实际;符合做实验所用仪器、设备的性能、精度的实际;符合实验的物理条件(如物体大小,有无磨擦等)的实际等。对实验结果进行评判、分析,必须结合实际情况,全面考虑,才能得出较正确的结论。

物理实验是以动手为主,手、脑并用的科学实践活动,必须进行实际的操作,只说不练习是不行的。模拟实验、仿真实验、演示实验都只能对实验课学习起到辅助作用,决不能取代实际操作训练,否则必然会造成“一看就懂,一做就错”的结局。

3. 综合性

一个物理实验涉及的知识领域往往是很宽广的,即使一个简单的力学实验,也常常涉及电学、光学、热学、机械学等方面的知识。实验工作是借助于仪器来进行的,要做好实验,单单搞懂实验的物理原理是不够的,还要知道仪器怎么工作,怎么让仪器正常工作,即要搞清楚仪器的基本结构及其工作原理,这往往又会涉及机械学、电子学,甚至自动控制等方面的知识。所以,一个优秀的实验工作者,它的知识面必须很宽广,不仅在某一学科领域有较深的造诣,而且在其他学科领域也要有一定的修养,并且会综合利用多学科的知识。

四、物理实验的教学环节

任何一个实验项目都包括课前预习、课堂操作和课后处理三个环节。

1. 课前预习

在到课堂动手做实验之前,先要认真仔细地阅读教材或实验指导书,在对教材内容有了初步了解之后,在实验报告纸上的开始部分写出预习报告。预习报告的内容包括实验名称、实验目的、实验原理简述、操作步骤及应注意的问题。预习报告要用“心”去写,即要在理解的基础上用自己的构思去写。特别是原理部分,切忌大篇幅抄书,应该用自己的语言,简明扼要、高度概括地讲明,其中应包括用到的物理理论依据,实验仪器的工作原理,有关测量的计算公式,相应实验技术中的电路图、光路图以及记录实验数据的表格。课前预习是对自学能力的极好锻炼。课前预习的好坏是实验中能否取得主动,甚至是实验成功与否的关键。

2. 课堂操作

课堂操作是动手能力,手与脑并用的训练过程。在正式进行之前,首先要熟悉一下将要使用的仪器、设备、量具等的性能以及正确的操作规程,切忌盲目操作;其次要全面地想一想实验操作程序,修正自己预习的操作步骤,尽量做到更加合理。

实验中,要注意对现象的观察,尤其是对所谓的“反常”现象更要仔细观察分析,不要单纯地追求“顺利”。要养成对观察到的现象和测得的数据随时进行判断的习惯,判断正在进行的实验过程是否正常合理。在观察、测量时,还要做到正确读数,而且要实事求是

地记录客观现象和数据。如能做到及时判断处理反常现象和排除实验过程中出现的故障就更难能可贵了。

做完实验,要将实验数据交给教师检查,得到认可后,再将仪器归整复原好,方可离开教室。

3. 课后处理

在课下对课上所测的实验数据进行处理和对观察到的实验现象进行分析。这与理论课的课下作业是完全不同的事,它本身就是一个实验的重要组成部分。

课后处理工作包括将课上测得的数据和观察到的现象工整地整理到实验报告纸上,位置可接在预习部分之后;对数据进行计算、处理,或按公式求出结果,或按函数关系用坐标纸作图,然后按误差理论求出结果的可靠程度——不确定度。最后给出实验结果的正确表达式。同时,对实验中观察到的现象,特别是看似反常的现象进行分析,力求找出其成因。

以上三个环节的有关文字内容集中在实验报告纸上,构成一份完整的实验报告。写实验报告是对一个人的文字表达能力、归纳综合能力、分析判断能力的有效训练。整个报告要求格式规整,字迹清楚,文理通顺,语言简明,数据齐全,图表正确,并按时上交。

第一篇 实验基础理论

第一章 测量误差与测量结果的不确定度

第一节 测量与有效数字

一、直接测量与间接测量

按测量结果获取方式的不同,测量可分为直接测量和间接测量。能从仪器或量具直接读出待测物理量的量值的测量称为直接测量;须由一组直接测量结果通过一定的函数关系计算出实验结果的测量称为间接测量。具体实验中,较多的实验结果是通过间接测量获取的,但所有的间接测量都是由直接测量组成的,所以直接测量在测量操作中十分重要。

二、等精度测量与不等精度测量

按进行测量的条件来分,测量又可以分为等精度测量与不等精度测量,在保证与测量工作有关的所有条件(仪器、设备、人员、环境等)都不变的情况下的测量称为等精度测量,否则称为不等精度测量。在物理实验中,在未加特别申明的情况下,指的都是等精度测量。

三、有效数字

测量的结果一定是由一组数字表示出来的,物理实验要求表示测量结果的数字既能反映所使用的测量仪器的精度,又能反映待测物体的大小,满足这种规定的所有数字称为有效数字。

直接测量的实质是一个比较过程,即用一个既定的已知量(称为标准量)去和待测量进行比较,其结果应表示成所选定的标准量的倍数;当不能恰为标准量的整数倍数时,则应给出一位不足标准量一倍的估计数。结果的单位与标准量的单相位同,称表示标准量整数倍数的所有数字为准确数字,准确数字可以反映待测物体的大小;估计的一位数字称为可疑数字,由可疑数字反映所用仪器的精度。表示物理实验测量结果的数据中所有准确数字和一位可疑数字均为有效数字。选用不同的标准量(即用不同精度的仪器、量具进行测量),所得到的有效数字也不相同。下面举例加以说明。

常用直尺或三角板,其刻度最小分格的长度为 1 mm,即其上给出的标准量为 1 mm。用这样的尺子去测量一支铅笔的长度,测出其长度是标准量的 177.0 倍,其中 177 倍是确定无疑的,而 0.0 倍是目测估计的,于是就可以认为铅笔的长度是 177.0 mm。如果用来测量的尺子的最小刻度为 1 cm,这时标准量变成 1 cm,比较的结果,铅笔长度为标

准量的 17.7 倍,其中 17 倍是确定无疑的,而 0.7 倍则是目测估计的,测得铅笔的长度应记为 17.7 cm。

测量结果的有效数字的个数称为有效数字的位数。上述例子中,以毫米为标准量时,测量结果的有效数字为 4 位,以厘米作为标准量时,测得结果的有效数字为 3 位。由以上还看到,一列有效数字的末位即便是 0,也不能随意舍去,因为它属于有效数字。而在以厘米作为标准量的测量结果中,却又不可在末尾加上个“0”,即有效数字的位数是由被测物体的大小和测量仪器、量具客观决定了的,不允许随意添加或删减。即便在进行单位换算时,也不能改变有效数字的位数。如想用米(m)为单位表示以上两种情况的测量结果时,应分别记为 0.1770 m 和 0.177 m。用千米(km)为单位表示以上结果时分别记为 0.000 177 0 km 和 0.000 177 km。一列有效数字的第一位数字前边的“0”不算有效数字,所以有效数字仍为 4 位和 3 位。通常对上面的情况采用科学计数法表示,分别记为 1.770×10^{-4} km 和 1.77×10^{-4} km。

当几个测量结果进行有效数字运算时,得到的最终结果也应由有效数字组成。下面给出一些有关的运算法则。

加减运算:在同一单位条件下,以各组有效数字中可疑数字的最高位为取舍界限,对于应予以舍去的数字,按 4 舍 6 入、逢 5 前面一位取偶数的约定执行。例如,

$$36.5 \text{ cm} + 14.32 \text{ cm} = 50.8 \text{ cm}$$

$$14.32 \text{ cm} - 1.745 \text{ cm} = 12.58 \text{ cm}$$

$$36.5 \text{ cm} + 128.75 \text{ cm} = 165.2 \text{ cm}$$

乘除运算:积(商)的有效数字位数,较多的教科书上都说取决于有效数字位数最少的一组,这就要求乘数的最后一位数字(可疑数字)与被乘数的第一位数字(可靠数字)相乘的结果中的所有数字都是可疑数字。为了减小运算误差,当结果的第一位数字是 1、2、3 时,允许多保留一位。

乘方、立方、开方运算:结果的有效数字位数应与底的有效数字位数相同。

常数 π 、e 等的有效数字:当常数 π 、e 参与运算时,其取值位数要求比测量值多取一位。例如,圆面积 $S = \pi R^2$,测量值 $R = 2.042 \text{ cm}$, π 的取值为 3.1416。如果将面积公式改为 $S = \frac{1}{4} \pi D^2$, $D = 4.084 \text{ cm}$,式中的 $\frac{1}{4}$ 是公式推导过程中出现的纯数字,并非测量值,

不存在有效数字的问题,可视它的位数是任意的,对有效数字的运算不起作用。

在进行普通的对数运算时,答案尾数的位数与底的位数相同。

在进行三角函数运算时,角度值的精度可以取到 1' 时,可以用四位函数表,角度值可以取到 10'' 的精度时,则应该使用五位函数表;角度值的精度达到 1'' 时,则必须用六位函数表。其余类推,使用计算器时,其取位也要参照上述约定。

第二节 测量误差及其分类

每一个待测物理量在一定条件下都具有确定大小的值,称其为待测物理量的真值。

实验工作主要就是测量这个真值。但事实是,实验时,由于理论的近似性,实验仪器性能的局限性,测量方法的不完善,环境条件的不稳定,测量人员感觉器官的功能限制等,使测量结果不可能绝对准确,待测物理量的真值与测量值之间总会存在某些差异,称之为测量误差,即

$$\text{测量误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

测量误差存在于一切测量数据之中,没有误差的测量结果是不存在的。随着科学技术水平的不断提高,测量误差可以控制得越来越小,但永远不会降为0。

称测量误差与被测量的真值之比为相对误差,即

$$\text{相对误差} = \frac{\text{测量误差}}{\text{被测量的真值}} \times 100\%$$

因而测量误差有时又称为绝对误差。绝对误差和相对误差均反映单次测量结果与物理量的真值之间的差异。

由于大多数情况下真值是无法预先准确知道的。为了考查测量结果相对于真值的偏离,误差理论指出,可以用对同一物理量等精度多次(n 次)重复测量结果的算术平均值来代替物理量的真值。相应地,称测量值与算术平均值之差为残差。

到此,我们引入一定的符号,对以上内容加以数学概括。用 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 表示第 i 次的测量值,用 x_0 表示物理量的真值, $\bar{x}$ 表示 n 次测量结果的平均值, δ_i 表示第 i 次测量值的绝对误差, v_i 表示第 i 次测量值的残差,则有

$$\delta_i = x_i - x_0 \quad (1.2.1)$$

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1.2.2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2.3)$$

$\bar{x}$ 又称为期望值,是对测量结果的最佳估计。对于验证性实验,常用由理论推导出的值(理论值)或公认的标准值为真值 x_0 。

测量的目的就是要尽可能准确地测出待测物理量的值,而所有的测量结果又都具有误差,因而人们不能追求绝对准确的测量,只能设法尽可能地提高测量的准确度,减小误差。为达到这一目的,就要对误差产生的原因及各种情况下产生的误差的性质进行分析研究。由此发展起一门以概率论和数理统计理论为基础的科学理论——测量误差理论。详细讲解误差理论不是本书的任务,本书只能对与处理实验数据有关的误差理论内容作简要的介绍。

按照误差产生的原因及其性质,误差可以分为系统误差和随机(偶然)误差,下面分别加以介绍,重点放在随机误差。

一、系统误差

在相同条件下,多次重复测量同一物理量时,测量值对真值的偏离(包括大小和方向)总是相同的,这类误差称为系统误差,系统误差的来源大致如下: