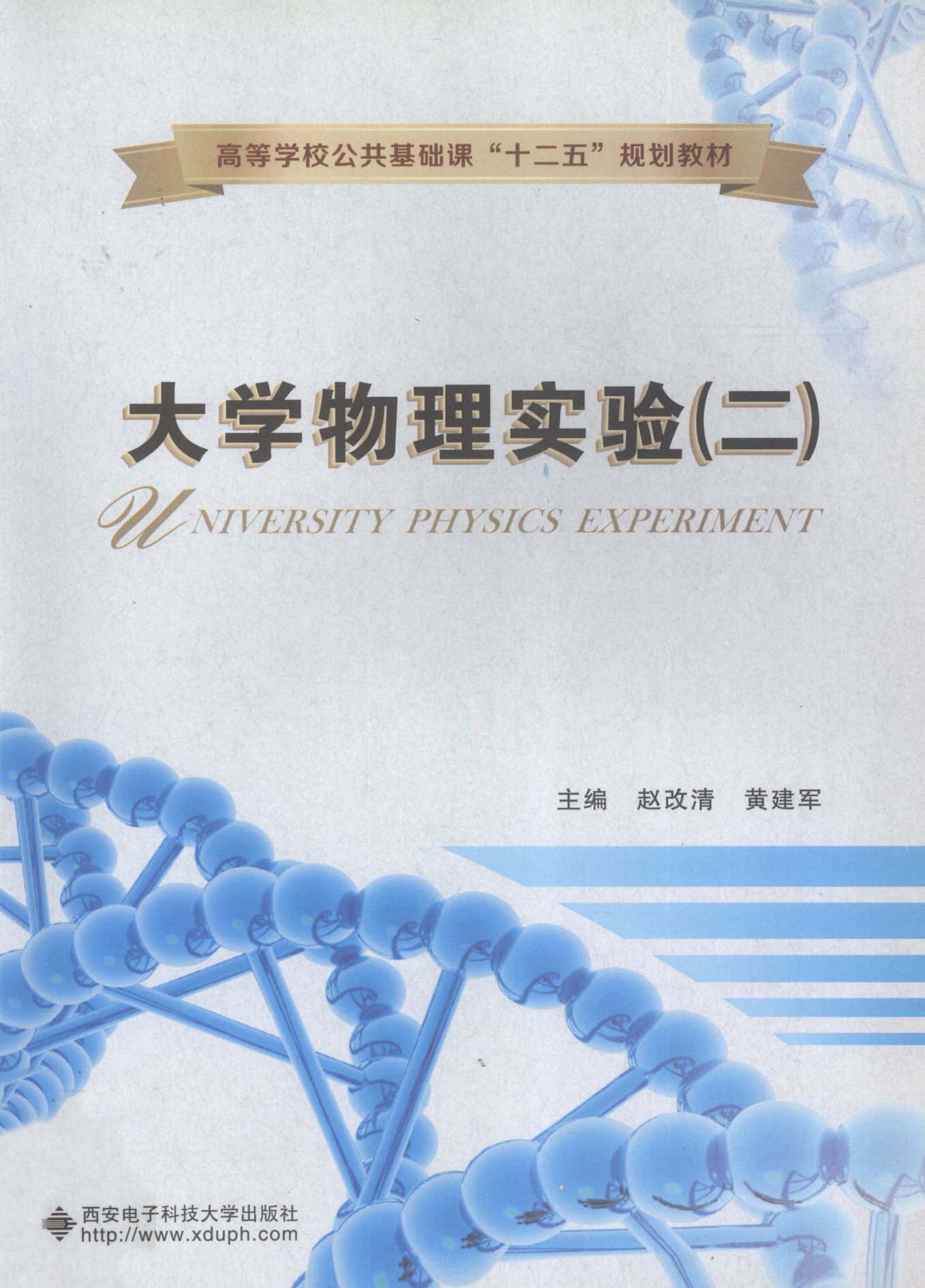




高等学校公共基础课“十二五”规划教材

# 大学物理实验(二)

*UNIVERSITY PHYSICS EXPERIMENT*

主编 赵改清 黄建军

基础课“十二五”规划教材

# 大学物理实验(二)

主 编 赵改清 黄建军  
副主编 张哲皇 余隽金 刘丽君  
王喜省 熊 丽

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书是按照广东省“省级大学物理实验教学示范中心”的建设要求,结合深圳大学物理实验分层次教学体系改革的精神编写而成的。本书第一章为绪论,主要讲述实验课程教学的基本要求,第二章讲述数据处理和不确定度评估,第三章精选了20个大学物理实验,包括验证性实验11个,设计性实验3个,近代物理实验4个,信息光学实验2个。

本书可作为高等学校各理工科基础物理实验教学的教材和参考书,也可供相关的实验技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验(二)/赵改清,黄建军主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2013.2

高等学校公共基础课“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2957-5

I. ①大… II. ①赵… ②黄… 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(2013)第 023700 号

策 划 毛红兵

责任编辑 王 飞 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 [www.xduph.com](http://www.xduph.com) 电子邮箱 [xdupfb001@163.com](mailto:xdupfb001@163.com)

经 销 新华书店

印刷单位 中铁一局印刷厂

版 次 2013年2月第1版 2013年2月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 11

字 数 257千字

印 数 1~3000册

定 价 19.00元

ISBN 978-7-5606-2957-5/O

XDUP 3249001-1

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

# 前 言

本书是为配合深圳大学物理实验教学体系的改革,同时参照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会发出的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》的精神,从培养基本科学实验技能,提高学生科学实验的基本素质出发而编写的。根据分层次教学的要求,大学物理系列实验教材规划分为零、一、二、三、四、五、六级 7 本教材,本书为大学物理实验(二)教材。实验(二)的教学目标重在培养学生的科学思维和创新意识,大学物理实验(二)教材在编写时注重介绍理论模型的建立过程和实验思想、实验方法,淡化实验步骤,在实验里增设了一些需要自主设计的内容,以求改变以往学生几乎不懂实验,按实验步骤也能进行实验的现象,引导学生在真正理解物理实验的实验思想和实验方法的基础上,去真正地完成实验。

本书内容涵盖了基础物理实验、近代物理实验、研究性实验、设计性实验共计 20 个实验。学生在学习过程中可根据兴趣选做 10 个实验。

大学物理实验(二)教材的编写团队由多年从事实验教学的教师组成,他们有着丰富的实践教学经验。参与本书编写的老师有赵改清(第一章、第二章、实验 1、实验 2、实验 3、实验 4、实验 6、实验 11、实验 14、实验 15、附录)、张哲皇(实验 5、实验 18、实验 19、实验 20)、余隽金(实验 7、实验 8、实验 12、实验 13)、刘丽君(实验 9、实验 10)、王喜省(实验 16)、熊丽(实验 17)。全书由黄建军、赵改清统稿;书中的全部插图由赵改清绘制;参与本书校对的还有江石寿、王喜省、邱云明。

由于编者水平有限,书中疏漏之处在所难免,希望广大师生在使用过程中提出宝贵意见。

编 者  
2012 年 10 月

# 目 录

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| 第一章 绪论 .....                                           | 1   |
| 第一节 物理实验课的教学基本要求 .....                                 | 1   |
| 第二节 实验课的基本程序及成绩考核 .....                                | 3   |
| 第二章 数据的处理和不确定度评估 .....                                 | 6   |
| 第一节 测量与有效数字 .....                                      | 6   |
| 第二节 不确定度的评估 .....                                      | 8   |
| 第三节 数据处理与结果表示 .....                                    | 12  |
| 第三章 物理实验 .....                                         | 17  |
| 实验 1 霍尔效应及其应用 .....                                    | 17  |
| 实验 2 RLC 电路谐振特性的研究 .....                               | 25  |
| 实验 3 电位差计 .....                                        | 32  |
| 实验 4 铁磁质动态磁滞回线观测 .....                                 | 38  |
| 实验 5 弗兰克-赫兹实验 .....                                    | 45  |
| 实验 6 表面张力系数的测定 .....                                   | 51  |
| 实验 7 应变传感器的特性研究及应用设计 .....                             | 55  |
| 实验 8 偏振现象的观测与研究 .....                                  | 63  |
| 实验 9 迈克尔逊干涉仪 .....                                     | 70  |
| 实验 10 声速的测量 .....                                      | 75  |
| 实验 11 超声光栅测声速 .....                                    | 79  |
| 实验 12 双棱镜干涉 .....                                      | 86  |
| 实验 13 交流电桥 .....                                       | 90  |
| 实验 14 阿贝成像原理和空间滤波 .....                                | 98  |
| 实验 15 全息照相 .....                                       | 104 |
| 实验 16 光栅光谱仪 .....                                      | 110 |
| 实验 17 干涉法测玻璃的热膨胀系数和折射率温度系数 .....                       | 119 |
| 实验 18 密立根油滴实验 .....                                    | 126 |
| 实验 19 电子荷质比的测量 .....                                   | 142 |
| 实验 20 金属电子逸出功的测定 .....                                 | 151 |
| 附录 1 中华人民共和国法定计量单位 .....                               | 162 |
| 附录 2 物理常数 .....                                        | 165 |
| 附录 3 $t$ 分布在不同置信概率 $P$ 与自由度 $\nu$ 的 $t_P(\nu)$ 值 ..... | 168 |

# 第一章 绪 论

## 第一节 物理实验课的教学基本要求

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的自然科学。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是其他自然科学和工程技术的基础。

在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现了一系列科学的世界观和方法论,深刻影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活,是人类文明的基石,在人才的科学素质培养中具有重要的地位。

物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

### 一、本课程的地位和作用

物理实验课是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。

物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生的科学实验能力及提高学生科学素质的重要基础。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面,具有其他实践类课程不可替代的作用。

### 二、本课程的具体任务

(1) 培养学生的基本科学实验技能,提高学生的科学实验基本素质,使学生初步掌握实验科学思想和方法;培养学生的科学思维和创新意识,使学生掌握实验研究的基本方法,提高学生的分析能力和创新能力。

(2) 提高学生的科学素养,培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风,认真严谨的科学态度,积极主动的探索精神,遵守纪律、爱护公共财产的优良品德。

### 三、教学内容的基本要求

大学物理实验包括普通物理实验(力学、热学、电磁学、光学实验)和近代物理实验,具体教学的基本要求如下:

(1) 掌握测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的基本能力。

① 掌握测量误差与不确定度的基本概念,能逐步学会用不确定度对直接测量和间接

测量的结果进行评估。

② 掌握处理实验数据的一些常用方法,包括列表法、作图法和最小二乘法等。随着计算机及其应用技术的普及,还需掌握用计算机通用软件处理实验数据的基本方法。

(2) 掌握基本物理量的测量方法。例如掌握长度、质量、时间、热量、温度、湿度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、光强度、折射率、电子电荷、普朗克常量、里德堡常量等常用物理量的测量方法,注意加强数字化测量技术和计算机技术在物理实验教学中的应用。

(3) 了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用。例如掌握比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法、干涉法、衍射法,以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法。

(4) 掌握实验室常用仪器的性能,并能够正确使用。常用仪器包括长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光仪、光谱仪、常用电源和光源等。

各高校应根据条件,在物理实验课中逐步引进在当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术,例如激光技术、传感器技术、微弱信号检测技术、光电子技术、结构分析波谱技术等。

(5) 掌握常用的实验操作技术。例如零位调整、水平/铅直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整,根据给定的电路图正确接线,对简单的电路进行故障检查与排除,以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节。

(6) 适当介绍物理实验史料和物理实验在现代科学技术中的应用知识。

#### 四、能力培养的基本要求

(1) 独立实验的能力——能够通过阅读实验教材、查询有关资料和思考问题,掌握实验原理及方法,做好实验前的准备;正确使用仪器及辅助设备,独立完成实验内容,撰写合格的实验报告;培养学生独立实验的能力,逐步形成自主实验的基本能力。

(2) 分析与研究的能力——能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行分析、判断、归纳与综合。掌握通过实验进行物理现象和物理规律研究的基本方法,具有初步的分析与研究的能力。

(3) 理论联系实际的能力——能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题的科学方法,逐步提高综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

(4) 创新能力——能够完成符合规范要求的具有设计性、综合性内容的实验,进行初步的具有研究性或创意性内容的实验,激发学生的学习主动性,逐步培养学生的创新能力。

#### 五、分层次教学基本要求

通过开设一定数量的基础性实验、综合性实验、设计性或研究性实验来实现分层次教学。这三个层次实验的教学学时比例大致分别为 60%、30%、10%(各学校可根据各自的特点和需要做适当调整,建议综合性实验、设计性或研究性实验的学时调整幅度分别不高于 25%,并含有一定比例的近代物理实验)。

(1) 基础性实验：主要学习基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能和基本测量方法、误差与不确定度及数据处理的理论与方法等，可涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理等各个领域的内容。此类实验为适用于各专业的普及性实验。

(2) 综合性实验：指在同一个实验中涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理等多个知识领域，综合应用多种方法和技术的实验。此类实验的目的是巩固学生在基础性实验阶段的学习成果，开阔学生的眼界和思路，提高学生对实验方法和实验技术的综合运用能力。各校应根据各自的实际情况设置该部分的实验内容(如综合的程度、综合的范围、实验仪器、教学要求等)。

(3) 设计性实验：根据给定的实验题目、要求和实验条件，由学生自己设计方案并基本独立完成全过程的实验。各校也应根据实际情况设置该部分的实验内容(如实验选题、教学要求、实验条件、独立的程度等)。

(4) 研究性实验：组织若干个围绕基础物理实验的课题，由学生以个体或团队的形式，以科研方式进行的实验。

设置设计性或研究性实验的目的是使学生了解科学实验的全过程，逐步掌握科学思想和科学方法，培养学生独立实验的能力和运用所学知识解决给定问题的能力。各校应根据自己的实际情况设置该类型的实验内容(如选题的难易程度，涉及的领域等)。

## 第二节 实验课的基本程序及成绩考核

### 一、预习

上课前应通读教材，以求对当次实验有个全面了解，精读有关数学模型，明确要测量的物理量，对主要仪器的功能及使用方法形成一个初步印象。

课前预习必须做书面预习报告，课上请老师审阅。无预习报告或预习报告不合格者不允许开始实验。预习报告一般包含以下内容：

(1) 实验名称和实验目的。

(2) 实验原理。用简明扼要的数学式或图示方式概括实验原理、实验条件，画好有关的框图、结构图、电路图或光路图。

(3) 仪器及操作要点。制表列出主要仪器的名称，留出课上填注编号、型号或规格的位置；注明主要仪器的使用方法及操作禁忌，避免课上束手无策或损坏仪器。

(4) 拟定出实验内容及操作步骤，以备课上参阅。

(5) 画出简单明了的数据表，用于课上填入测量数据及其单位。

上课时，预习报告必须带来。教师除检查书面报告外，还会提问并作记载，以便全面衡量预习质量。

预习是实验的一个重要环节，通过课前预习环节，可逐步培养高效率的自学能力。

### 二、上课

(1) 提前五分钟进入实验室，按组号入座，使用本组仪器完成实验。仪器出现故障请备用仪器更换，严禁擅自调换别组的仪器。故障仪器放置在讲台备修。

(2) 多数仪器都比较贵重,有时还会有危险。要对自己和他人的安全负责,对国家财产负责,认真执行操作规程。如果在不了解仪器的情况下冒然动手,轻则仪器失调,给别人带来麻烦,重则造成事故。走进任何实验室,都不要擅自动手,这是尊重他人的起码素养之一。

(3) 注意在细节上培养科学作风,如仪器布局合理整齐,操作姿势正确文明;电学仪器经教师检查后才能通电;不要触摸光学元件的工作表面;实验完毕及时断开电源,整理仪器并恢复到原来的陈列状态;主动请老师指导操作、检查数据、验收仪器。

科学实验是一种精细的手工劳动,更是一种复杂的脑力劳动,是理论与实践相结合的典型过程。要对实验现象十分敏感,准确判断,果断决策。出现故障应立即控制现场(如断电、降温等),及时报告老师,分析原因,排除故障,总结教训,逐步积累临场经验。损坏和丢失仪器应按规定赔偿。

教师的指导和规则的约束是完成教学的保障,但绝不意味着束缚学生的活力。学生既要勇于发问,又要有所见地;既要吃透规则,又要有所创新。

(4) 记录数据要完整准确,实事求是。有些实验条件(如温度、仪器规格等)比较重要,但不一定参加运算,不要漏记。

实验数据不得随意改动,仅当确认测量有误时才能修改。先在原数据上轻轻地划一条横线,再把重新测到的数据工整地写在一旁,必要时应注明更改理由。不应重笔描画、涂抹黑块甚至撕扯挖补,这样既影响卷面整洁,也失去了分析错误的依据。有时毁掉的数据反而是正确的。

实验课绝不以“数据完美”评定成绩,切不可凭借主观意愿更改数据,更不允许抄袭、拼凑和伪造数据。只有依靠真实数据,才能看到事物的本来面貌。操作完毕应主动请教师审核实验记录并签字,不经教师签字的记录无效。

(5) 保持实验环境的安静整洁,不得在室内吸烟、吃零食、扔废纸、藏掖果皮、嚼口香糖、大声喧哗和随意走动。要爱护室内设施,主动把自己的桌面清理干净。

(6) 实验完毕要整理仪器、桌面。整理之前请教师审核数据,确认实验数据无误再开始整理。电学仪器在关电之前调小电压、电流输出。

### 三、作业与考核

#### 1. 实验报告要求

正规的科学技术实验都要撰写实验报告。实验报告是在实验记录的基础上充实、归纳、整理出来的。实验记录应随实验报告一起交给教师,无原始实验记录的报告不予承认。实验报告应在规定的时间内上交,晚交者酌情扣分,不交报告记零分。报告应独立完成,雷同报告酌情扣分,直至记零分。

实验报告要使用统一的“实验报告纸”,使用同一封面。实验报告包括下列内容:

(1) 实验封面。含有实验题目、班级、姓名、组别、合作者、实验日期等信息。

(2) 实验目的。

(3) 仪器和器材。包括主要仪器的名称、规格和编号。

(4) 实验原理。说明有关物理效应如何具体应用于实验,包括数学模型的导出,简要的文字说明和必要的图形(装置图、框图、电路图、光路图等)。

(5) 实验步骤。主要是为保证实验条件和结果而采取的关键性步骤,一般不言自明的内容可略去不写,要充分注意条理性、逻辑性和可操作性。

(6) 数据处理。通过模仿或自行设计,画出简明合理的表格,把实验记录中的原始数据一一转抄过来。数据处理包括结果计算、不确定度评定和曲线图等内容。凡属计算,均应有文字公式、代入数据和计算结果等主要运算步骤,且不要漏写单位。

(7) 实验结果。包括测量结果的规范表示和观察现象、研究规律所得出的结论。

(8) 讨论。对本实验的原理、方法、仪器、不确定度评定的进一步探讨或提出改进建议,要有具体分析,切忌泛泛空谈,有则写,无则免。

(9) 问答题。

以上各项内容要详略得当,不同实验突出不同重点,不必拘泥格式,不要牵强附会拼凑条目。描述部分不应盲目抄袭教材,也不提倡长篇大论,要按照自己的理解,用自己的语言扼要阐述。卷面书写要整洁美观,图文并茂。

每次发回实验报告,都要仔细阅读教师的批改意见,及时改错,主动争取教师补批。教师退回的不合格报告,应弄懂问题,重写后连同原报告再上交。

## 2. 成绩考核

本课程的成绩由平时成绩和考试成绩合并评定,平时成绩参考课前预习效果、课内操作水平和课后报告质量给出。学生有正当理由缺课的,应履行请假手续,事后要主动请求补课。无故缺课者不安排补课,该次成绩记零分。考试形式为操作考试,要求现场完成实验并提交报告。

总成绩 = 平时成绩  $\times 0.7$  + 考试成绩  $\times 0.3$ 。

## 第二章 数据的处理和不确定度评估

### 第一节 测量与有效数字

#### 一、测量

测量是指以确定量值为目的的操作,其实质是将待测物体的某物理量与相应的标准作定量比较。测量的结果应包括数值、单位以及结果可信赖的程度(用不确定度来表示)。

#### 二、真值

真值是指一个变量本身所具有的真实值,它是一个理想的概念,一般是无法得到的。

**例 1** 普通直尺测量某物体的长度是 22.5 mm,若用游标卡尺测量则会是 22.53 mm,而用千分尺测量就会是 22.534 mm,假如用精确度更高的测长度仪器测量就会得到数字位数更多的测量结果。

到底哪个是真实值呢?都不是,这说明真实值是不可知的。一般用约定真值或相对真值来代替真值。实验中某量的真值常用相同条件下的多次测量的算术平均值代替。精确度更高的测量结果更接近真实值,可信赖程度更高些。

#### 三、有效数字

##### 1. 有效数字的定义

在测量中,有效数字是指实际能够测量到的数字。所谓能够测量到的数字,是包括最后一位估计的、不确定的数字。我们把通过直读获得的准确数字叫做可靠数字;把通过估读得到的那部分数字叫做存疑数字。把测量结果中能够反映被测量大小的带有一位存疑数字的全部数字叫有效数字。

在数学上,有效数字有更严格的定义:当一个近似数引入的误差的绝对值小于近似数末位的 0.5 时,从该近似数左边第一个非零数字起到最后一位均为有效数字。例如对  $\pi$  的近似:

$$3.14: |3.14 - 3.1415926\cdots| = 0.00159\cdots < 0.005 \quad (2-1)$$

$$3.141: |3.141 - 3.1415926\cdots| = 0.00059\cdots > 0.0005 \quad (2-2)$$

$$3.142: |3.142 - 3.1415926\cdots| = 0.00040\cdots < 0.0005 \quad (2-3)$$

式(2-1)中  $\pi$  的近似值取 3.14 时,是三位有效数字;

式(2-2)中  $\pi$  的近似值取 3.141 时,仍然是三位有效数字;

式(2-3)中  $\pi$  的近似值取 3.142 时,是四位有效数字。

关于有效数字作以下几点说明：

(1) 有效数字中只应保留一位存疑数字，因此在记录测量数据时，只有最后一位有效数字是存疑数字。

(2) 在存疑数字中，要特别注意 0 的情况。0 在非零数字之间与末尾时均为有效数字；在小数点前或小数点后均不为有效数字。如 0.078 和 0.78 与小数点无关，均为两位有效数字；506 为 3 位有效数字；220.0 为 4 位有效数字。

(3)  $\pi$  等常数，具有无限位数的有效数字，在运算时可根据需要取适当的位数。

(4) 实验中的数字与数学上的数字是不一样的，如

数学中： $8.35 = 8.350 = 8.3500$

实验中： $8.35 \neq 8.350 \neq 8.3500$

(5) 有效数字的位数与被测物的大小和测量仪器的精密度有关，如前面例 1 中测得物体的长度，用卡尺测为 22.58 mm，有效数字是 4 位，若改用千分尺来测则为 22.584 mm，其有效数字的位数有 5 位。

## 2. 有效数字的修约规则

数字尾数的舍入叫修约。通用的修约规则为“四舍六入五凑偶”，即拟舍弃的尾数大于 5 则进 1，小于 5 则不进，等于 5 时要看保留的末位，保留的末位是奇数则进 1，保留的末位是偶数则不进。

例 2 将下列近似数保留三位数字：

36.78, 42.44, 1.535, 12.45

解  $36.78 = 36.8$ ,  $42.44 = 42.4$ ,  $1.535 = 1.54$ ,  $12.45 = 12.4$

## 3. 有效数字近似计算的一般规则

(1) 可靠数字之间运算的结果为可靠数字。

(2) 可靠数字与存疑数字、存疑数字与存疑数字之间运算的结果为存疑数字。

(3) 测量数据一般只保留一位存疑数字。

例 3  $6.80\bar{5} + 1.14\bar{7} = 7.94\bar{5} = 7.9\bar{4}$  (在数字上加一横杠表示那位数字是存疑数字)

例 4  $1.23\bar{4} \times 0.01\bar{1} = 0.1\bar{3}574 = 0.1\bar{3}$ ，方法如下

$$\begin{array}{r} 1.23\bar{4} \\ \times 0.01\bar{1} \\ \hline 1\bar{2}3\bar{4} \\ 123\bar{4} \\ \hline 0.1\bar{3}57\bar{4} \end{array}$$

## 4. 有效数字近似计算的具体规则

用有效数字近似计算的一般规则判别要保留的有效数字位数，做起来比较繁琐，所以人们在一般规则的基础上总结出了有效数字近似计算的具体规则，以便快速判断需要保留的有效位数。

(1) 有效数字相加(减)：结果的末位数字所在的位置应按各量中存疑数字所在数位最前的一个为准来决定。

例 5  $30.4 + 4.325 = 34.7$ ,  $26.65 - 3.905 = 22.74$

(2) 乘(除)运算: 结果的有效数字的位数与参与运算的数字中有效数字位数最少的相同; 乘方、开方后的有效数字位数与被乘方和被开方之数的有效数字的位数相同。

例 6  $5.348 \times 2.04 = 10.9$ ,  $29.4^2 = 864$ ,  $\sqrt{36.87} = 6.072$

(3) 对数运算: 对数的小数位数与真数的确定数字位数相同(数字上有一杠表示那一位是存疑数字)。

例 7  $\lg 6.80\bar{5} = 0.832\bar{83}$ ,  $\lg 68.0\bar{5} = 1.832\bar{83}$

其他函数运算可以类推。

例 8  $\sin 1.0\bar{3} = 0.85\bar{73}$ ,  $\arctan 5.77\bar{2} = 1.39\bar{92}$

注意: 有效数字近似计算的具体规则有一定的适用范围, 在多数情况下, 具体规则得出的有效数字位数是正确的, 个别情况也会有例外, 在测量精度要求比较高时需要运用一般规则来确定有效数字位数。

## 第二节 不确定度的评估

### 一、不确定度评定的意义

即使采用了正确的测量方法, 由于测量仪器和测量者的问题, 测量结果也不可能是绝对准确的, 它必然有不确定的成分。这种不确定的程度可以用一种科学的、合理的、公认的方法来表征, 这就是“不确定度”的评定。测量不确定度表征测量值可信赖的程度, 或者说它是被测量值在某一范围内的一个评定。不确定度的评定十分重要, 但以往各国对不确定度的表示和评定都有不同的方法和规定, 这无疑影响了国际间的交流和合作。1992 年, 国际标准化组织(ISO)发布了具有指导性的文件《测量不确定度表示指南》(以下简称《指南》), 为世界各国不确定度的统一奠定了基础。1993 年 ISO 和国际理论与应用物理联合会(IUPAP)等七个国际权威组织又联合发布了《指南》的修订版。从此, 物理实验的不确定度评定有了国际公认的准则。

《指南》对实验中测量不确定度有十分严格而详尽的论述, 作为普通物理实验教学, 只要求对不确定度的下述基本概念有初步的了解。

测量不确定度分为 A 类标准不确定度和 B 类标准不确定度。前者由观测列统计分析评定, 也称为统计不确定度; 后者不按统计分析评定, 也叫非统计不确定度。不确定度的统计分量一般服从正态分布。

### 二、正态分布和标准偏差

在相同条件下对物理量  $x$  做  $n$  次测量, 得到包含  $n$  个测量值  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的一个测量列, 概率论可以证明, 其算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-4)$$

为最佳值也称期望值, 是最可以信赖的。

假设  $n$  次测量中, 测量值  $x$  落在区间  $[x - dx, x + dx]$  的次数为  $dn$  次,  $P = \frac{dn}{n}$  称为  $x$

落在区间 $[x-dx, x+dx]$ 内的概率或置信度, 定义概率密度为

$$f(x) = \frac{dn}{n dx} \quad (2-5)$$

概率论表明: 测量结果总是在真值 $\mu$ 附近, 越靠近 $\mu$ 出现的概率越大。概率密度函数一般服从正态分布(高斯分布), 其形状如图 2-1 所示, 其函数形式为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-(x_i - \bar{x})^2 / 2\sigma^2} \quad (2-6)$$

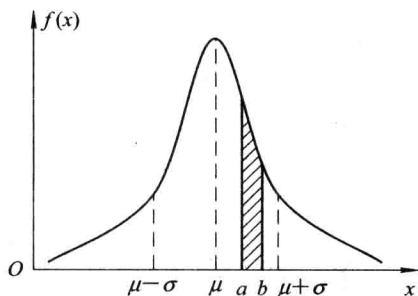


图 2-1 正态分布曲线

图中拐点处的坐标和 $\mu$ 的差的绝对值, 称为正态分布的标准偏差 $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-7)$$

图中阴影部分面积的物理意义是 $x$ 落在区间 $[a, b]$ 内的概率:

$$P = \int_a^b f(x) dx = \int_a^b \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-(x_i - \bar{x})^2 / 2\sigma^2} dx \quad (2-8)$$

由此式可以求出,  $x$ 落在区间 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 、 $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$ 、 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 、 $[-\infty, \infty]$ 内的概率分别为

$$P = \int_{\mu - \sigma}^{\mu + \sigma} f(x) dx = 0.683$$

$$P = \int_{\mu - 2\sigma}^{\mu + 2\sigma} f(x) dx = 0.954$$

$$P = \int_{\mu - 3\sigma}^{\mu + 3\sigma} f(x) dx = 0.997$$

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$$

正态分布还具有以下特点:

- (a) 对称性: 无论比平均值大还是小, 其差值的绝对值相等时出现的概率相等;
- (b) 单峰性: 与平均值相差越大, 出现的概率越小;
- (c) 有界性: 在一定条件下, 标准差的绝对值有一定限度;
- (d) 抵偿性: 标准差的算术平均值随着 $n \rightarrow \infty$ 而趋于零。

### 三、标准不确定度的基本概念和分类

测量不确定度分为 A 类标准不确定度和 B 类标准不确定度。前者由观测列统计分析

评定,也称为统计不确定度;后者不按统计分析评定,也叫非统计不确定度。

### 1. A 类标准不确定度

在相同条件下对物理量  $x$  做  $n$  次测量,用算术平均值  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  作为测量结果的最佳值,它的 A 类不确定度为

$$\delta_A(x) = t \sqrt{\sum_{k=1}^n \frac{(x_k - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2-9)$$

式中的  $t$  就称为“ $t$  因子”,它与测量次数和“置信概率”有关(所谓“置信概率”,是指真值落在  $\bar{x} \pm \delta_A$  范围内的概率)。 $t$  因子的数值可以根据测量次数和置信概率查表 2-1 得到,当测量次数较少或置信概率较高时,  $t > 1$ ; 当测量次数  $n \geq 10$  且置信概率为 68.3% 时,  $t \approx 1$ ; 在大多数普通物理教学实验中,为了简便,取  $t = 1$ 。注意:我们的实验中约定多次测量时测量次数取 5 次,置信概率  $P = 0.683$ ,取  $t = 1$ 。

表 2-1 不同置信概率下  $t$  因子与测量次数的关系

| $t \backslash P$ | $n$ | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 15   | 20   | $\infty$ |
|------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| 0.68             |     | 1.32 | 1.20 | 1.14 | 1.11 | 1.09 | 1.08 | 1.07 | 1.06 | 1.04 | 1.03 | 1        |
| 0.90             |     | 2.92 | 2.35 | 2.13 | 2.02 | 1.94 | 1.86 | 1.83 | 1.76 | 1.73 | 1.71 | 1.65     |
| 0.95             |     | 4.30 | 3.18 | 2.78 | 2.57 | 2.46 | 2.37 | 2.31 | 2.26 | 2.15 | 2.09 | 1.95     |
| 0.99             |     | 9.93 | 5.84 | 4.60 | 4.03 | 3.71 | 3.50 | 3.36 | 3.25 | 2.98 | 2.86 | 2.58     |

### 2. B 类标准不确定度 $\delta_B$

若对某物理量  $x$  进行单次测量,那么 B 类不确定度由测量不确定度和仪器不确定度两部分组成,为简单起见,我们在计算时 B 类不确定度时只考虑仪器不确定度  $\Delta_{\text{仪}}$ ,即

$$\delta_B(x) = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{c} \quad (2-10)$$

仪器不确定度  $\Delta_{\text{仪}}$  是由仪器本身的特性所决定的,仪器说明书上所标明的“最大误差”或“不确定度限值”就称为仪器误差。 $\Delta_{\text{仪}}$  值视具体的仪器不同而不同,实验时一般会给定。 $c$  是一个与  $\Delta_{\text{仪}}$  的概率分布特性有关的常数,称为“置信因子”。仪器不确定度  $\Delta_{\text{仪}}$  的概率分布通常有正态分布、均匀分布、三角分布以及反正弦分布、两点分布等。对于正态分布、均匀分布和三角形分布,置信因子  $c$  分别取 3、 $\sqrt{3}$  和  $\sqrt{6}$ 。如果仪器说明书上只给出不确定度限值(即最大误差),没有关于不确定度概率分布的信息,则一般可用均匀分布处理,本书实验统一按均匀分布处理,取

$$\delta_B(x) = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (2-11)$$

有些仪器说明书没有直接给出其仪器误差限值,但给出了仪器的准确度等级,那么它的仪器误差限值  $\Delta_{\text{仪}}$  就需要经过计算才能得到。表 2-2 给出了常用仪器的最大允差  $\Delta_{\text{仪}}$ 。

表 2-2 常用仪器量具的主要技术指标要求和最大允差  $\Delta_{\text{仪}}$ 

| 量具    | 量程      | 最小分度值   | 最大允差 $\Delta_{\text{仪}}$ |
|-------|---------|---------|--------------------------|
| 钢直尺   | 150 mm  | 1 mm    | $\pm 0.10$ mm            |
|       | 500 mm  | 1 mm    | $\pm 0.15$ mm            |
|       | 1000 mm | 1 mm    | $\pm 0.20$ mm            |
| 游标卡尺  | 125 mm  | 0.02 mm | $\pm 0.02$ mm            |
|       | 300 mm  | 0.05 mm | $\pm 0.05$ mm            |
| 螺旋测微器 | 0~25 mm | 0.01 mm | $\pm 0.004$ mm           |
| 七级天平  | 500 g   | 0.05 g  | 0.08 g(接近满量程)            |
|       |         |         | 0.06 g(1/2 量程附近)         |
|       |         |         | 0.04 g(1/3 量程附近)         |
| 普通温度计 | 0~100℃  | 1℃      | $\pm 1^\circ\text{C}$    |
| 精密温度计 | 0~100℃  | 1℃      | $\pm 0.2^\circ\text{C}$  |

#### 四、标准不确定度的合成

在相同条件下,对  $x$  独立进行多次重复测量时,待测量  $x$  的标准不确定度  $\delta(x)$  由 A 类不确定度  $\delta_A(q)$  和仪器不确定度  $\delta_B(q)$  合成而得

$$\delta(x) = \sqrt{\delta_A^2(x) + \delta_B^2(x)} \quad (2-12)$$

其中  $\delta_A(x) = \sqrt{\sum_{k=1}^n \frac{(x_k - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$ ,  $\delta_B(x) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}}$ ,  $\Delta$  是仪器误差。

#### 五、间接测量量标准不确定度的传播

在间接测量时,待测量(即复合量)是由直接测量的量通过计算而得的。若

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2-13)$$

且各  $x_i$  相互独立,则测量结果  $y$  的标准不确定度的  $u(y)$  传递公式为

$$\delta^2(y) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \delta^2(x_i) \quad (2-14)$$

$x_i$  为直接测量量,每个  $\delta(x_i)$  均由两类不确定度按式(2-12)或式(2-13)合成。

由式(2-14)可以得到一些常用的不确定度传递公式如下:

对加减形式的函数  $y = ax_1 \pm bx_2$ , 有

$$\delta(y) = \sqrt{a^2 \delta^2(x_1) + b^2 \delta^2(x_2)} \quad (2-15)$$

对积商形式的函数  $y = x_1^a \cdot x_2^b$ , 有

$$\frac{\delta(y)}{y} = \sqrt{\left[ \frac{a\delta(x_1)}{x_1} \right]^2 + \left[ \frac{b\delta(x_2)}{x_2} \right]^2} \quad (2-16)$$

## 第三节 数据处理与结果表示

### 一、数据处理的规范

#### 1. 数据计算规范

数据计算规范包括:

(1) 先要有文字公式, 再按文字公式中各变量的顺序代入数据, 然后才能写出结果。

例 9 某物理量的测量公式为

$$Y = \frac{8mgLD}{\pi d^2 Rn}$$

式中各量的测量结果如表 2-3 所示:

表 2-3 测量结果

| $d_i/\text{cm}$ | $n_i/\text{cm}$ | $m/\text{kg}$ | $L/\text{cm}$ | $R/\text{cm}$ | $D/\text{cm}$ | $g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ |
|-----------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------------------|
| 0.0500          | 3.99            | 2.5000        | 80.0          | 8.00          | 150.0         | 9.7986                             |

$$Y = \frac{8mgLD}{\pi d^2 Rn} = \frac{8 \times 2.5000 \times 9.7986 \times 80.0 \times 10^{-2} \times 150.0 \times 10^{-2}}{3.14159 \times (0.05004 \times 10^{-2})^2 \times 8.00 \times 10^{-2} \times 4.002 \times 10^{-2}}$$

$$= 9.34 \times 10^{10} \text{ Pa}$$

(2) 运算属于中间结果的, 暂且保留 2 位不确定数字, 以便该结果在参加以后的运算时不致带去太大的修约误差。

下面以例 2 说明修约误差的单向积累效应。

例 10 某班一次考试成绩分布如下: 100~90 分 2 人, 89~80 分 9 人, 79~70 分 16 人, 69~60 分 6 人, 60 分以下 2 人, 求各档百分比, 并验算。

解  $2+9+16+6+2=35$  人

$$2 \div 35 = 6\%$$

$$9 \div 35 = 26\%$$

$$16 \div 35 = 46\%$$

$$6 \div 35 = 17\%$$

$$2 \div 35 = 6\%$$

验算:  $(6+26+46+17+6)\% = 101\%$ , 修约误差出现较大的单向积累, 得出不合常理的结果。下边令各百分数多保留一位尾数, 得

$$2 \div 35 = 5.7\%$$

$$9 \div 35 = 25.7\%$$

$$16 \div 35 = 45.7\%$$

$$6 \div 35 = 17.1\%$$

$$2 \div 35 = 5.7\%$$

验算:  $(5.7+25.7+45.7+17.1+5.7)\% = 99.9\%$  修约误差的单向积累减小, 计算结果趋于合理。