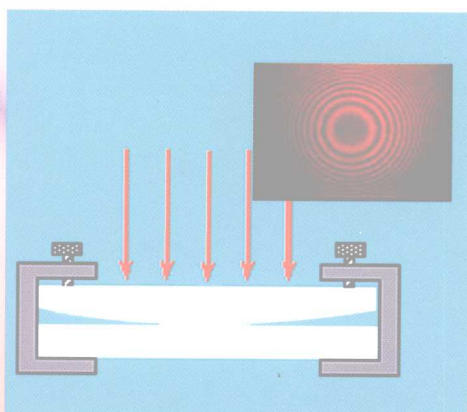
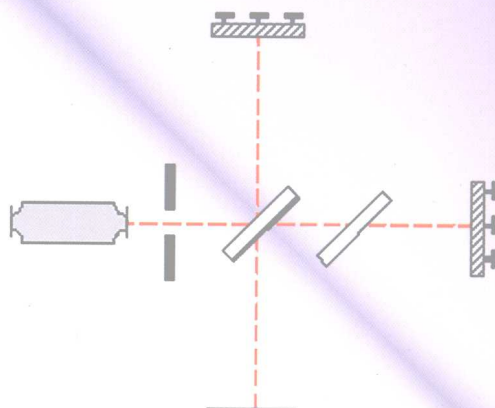


全国高等农林院校“十一五”规划教材
全国高等农林院校基础类课程教材

大学物理实验

(第2版)

陈晓春 郑泽清 韩学孟 主编



中国林业出版社

全国高等农林院校“十一五”规划教材
全国高等农林院校基础类课程教材

大学物理实验

(第2版)

陈晓春 韩学孟 郑泽清 主编

中国林业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验/陈晓春, 郑泽清, 韩学孟主编. -2 版. 北京: 中国林业出版社, 2008. 8

全国高等农林院校基础类课程教材

ISBN 978-7-5038-4932-9

I. 大… II. ①陈… ②郑… ③韩… 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 (2007) 第 122432 号

出版 中国林业出版社 (100009 北京西城区德内大街刘海胡同 7 号)

E-mail forestbook@163.com 电话 010-66162880

网址 www.cfph.com.cn

发行 中国林业出版社

印刷 北京林业大学印刷厂

版次 2001 年 8 月第 1 版

2007 年 8 月第 2 版

印次 2007 年 8 月第 1 次

开本 787mm × 1092mm 1/16

印张 17.5

字数 443 千字

印数 1 ~ 5000 册

定价 23.00 元

内容提要

本书是根据国家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《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》(2004 年 12 月)的精神;结合生物科学的特点而编写的。全书内容共分八章,第一章讲述不确定度的评定和数据处理的一般方法;第二章介绍物理实验的典型测量技术与方法;第三章至第六章为基础实验部分(包括力学、热学、电磁学、光学实验);第七章为设计与研究性实验;第八章为综合与技术性物理实验。全书共编入 65 个实验。所编入的实验都经过长期教学实践的锤炼,内容比较成熟,能够使学生在基本实验方法、基本实验技术和常用实验仪器的使用等方面得到比较全面而系统的训练。

本书可作高等农林院校工科及农科类各专业的教材,亦可供相关专业师生参考。

第二版前言

本书是根据国家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《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》(2004年12月)的精神,在中国林业出版社2001年版《大学物理实验》的基础上,结合生物科学的特点和编者近年来教学经验和改革的成果,吸收许多兄弟院校实验教学经验的精华而编写的。此次修订,在保持原有特色的基础上主要做了以下几方面的改动:

(1) 在数据处理方面摒弃了传统误差理论的一些概念和内容,以由国际权威组织制定的《测量不确定度表示指南》为标准来阐述不确定度的评定,使之与当今科学技术的发展相适应。在编写中考虑到大学物理实验的要求,进行了一些必要的简化,使学生既能理解测量不确定度的概念和掌握评定不确定度的基本方法,又不会陷入过于严格繁琐的计算之中。

(2) 增加“设计与研究性实验”一章。对实验研究中课题的选择、实验方案的设计、论文的写作进行了说明,编入我们多年教学实践中较成熟的设计性实验12个。

(3) 重新调整了实验内容的编排,将一些技术性较强的实验与近代物理实验、综合性物理实验合并为一章,主要是考虑到实验教学一般按基础实验(力、热、电、光)、设计性实验和提高性实验(综合与技术性物理实验)的层次安排。

(4) 加强了综合性实验的内容,如“温度传感器特性与温度控制的研究”、“干涉法测量膨胀系数”、“光谱测量技术”等实验。

本书由陈晓春、韩学孟、郑泽清任主编。

参加本书修订工作的有:陈晓春(绪论、第一、二、三、七章,阅读材料A、C,附录I~III)、韩学孟(第四章中“热学实验基础知识”及实验9,第五章,第八章中实验40、41、42、43-1、45,阅读材料D、E)、郑泽清(第四章中实验11、12,第六章、第八章中实验48-1、49、50、51、52-1,阅读材料F、G、H)、武秀荣(第四章中实验7、8,第八章中实验52-3)、李耀维(第四章中实验10、第八章中实验52-2)、范铁林(第八章中实验44、46、47,阅读材料B)、段智英(第八章中实验43-2、48-2)、郭锐(第八章中实验53),全书由陈晓春总策划和负责统稿。

本书在修订过程中参阅和引用了兄弟院校教材中的有关内容和仪器生产厂家的说明书,得到了山西农业大学教务处和中国林业出版社的大力支持,在此我们向他们及所有关心此书编写和出版的同志表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中必有不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

2007年6月

第一版前言

本书以我们历届使用过的物理实验指导书为基础,结合编者近二十年的实验教学经验编写而成。

全书内容共分七章。第一章讲述实验误差的基本理论与数据处理;第二章介绍物理实验的典型测量技术与方法;第三章至第七章包括力学、热学、电磁学、光学和近代物理实验,共编入41个实验。此外还选编了部分阅读材料,附于相关章节之后,供读者参考。编写时,我们力求做到叙述准确,简明扼要。对实验仪器的描述注重其结构原理而尽量不涉及具体的型号,以提高学生使用仪器的能力。在许多实验项目中,对其意义、各种实验(测量)方法和相关的背景知识作了简要的说明。在编写体例上,与传统实验教材相比更具有可读性。所编入的实验都经过长期教学实践的锤炼,内容比较成熟,能够使学生在基本实验方法、基本实验技术和常用实验仪器的使用等方面得到比较全面而系统的训练。实验项目和每个实验的内容都有较大的选择余地。可供农林、畜牧、水产院校各专业和农林院校中的农业机械、农业电气与自动控制、食品加工、林产品加工等工科专业使用,亦可做相关专业的参考书目。

本书由陈晓春副教授、韩学孟副教授、郑泽清副教授主编。

参加编写的有:陈晓春(绪论,第一、二、三章,实验1~6,阅读材料A、C,附录I~III)、韩学孟(第四章中“热学实验基础知识”及实验9,第五章中“电磁学实验基础知识”及实验13~26;阅读材料D、E)、郑泽清(第四章中实验11、12,第六、七章,阅读材料F、G、H)、武秀荣(第四章中实验7、8)、李耀维(第四章中实验10)、范铁林(第五章中实验27、28,阅读材料B)。

本书的完成,凝聚着教研室全体教师和实验技术人员长期努力的心血,许多实验教师为早期的实验教学和教材建设付出了巨大的劳动。本书的顺利出版得到了很多同志的大力支持,在此我们一并向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中一定有不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

编者

2001年4月

目 录

第二版前言

第一版前言

绪 论	(1)
第一章 实验误差与数据处理	(3)
第一节 测量及其有效数字	(3)
第二节 实验误差与不确定度	(5)
第三节 不确定度的评定	(8)
第四节 实验数据处理的基本方法	(13)
习 题	(19)
阅读材料 A 正态分布与置信概率	(21)
第二章 物理实验方法概述	(24)
第一节 基本测量方法	(24)
第二节 物理实验中的典型测量方法	(28)
第三节 转换测量技术	(31)
第四节 模拟法和示踪法	(33)
第五节 计算机辅助实验的方法与技术	(34)
习 题	(36)
阅读材料 B 传感器技术	(37)
第三章 力学实验	(40)
力学实验基础知识	(40)
一、长度的测量	(40)
二、质量的测量	(46)
三、时间的测量	(49)
实验 1 长度测量练习	(52)
实验 2 物体密度的测量	(53)
2-1 用流体静力称衡法测定固体的密度	(54)
2-2 用比重瓶测定固体的密度	(55)
实验 3 重力加速度的测定	(56)
3-1 单摆法	(56)
3-2 落球法	(58)
实验 4 用三线摆法测定物体的转动惯量	(59)
实验 5 用拉伸法测金属丝的杨氏模量	(62)
实验 6 简谐振动的研究	(67)
阅读材料 C 实验应力分析	(69)

第四章 热学实验	(71)
热学实验基础知识	(71)
一、温度的测量	(71)
二、热学实验中的量热术	(74)
实验7 液体温度计的使用	(75)
实验8 用电流量热器法测液体的比热容	(77)
实验9 用混合法测定冰的熔解热	(80)
实验10 用落球法测定液体的黏度	(83)
实验11 液体表面张力系数的测定	(85)
11-1 拉脱法	(85)
11-2 毛细管法	(88)
实验12 固体线膨胀系数的测定	(89)
阅读材料D 差热分析技术	(92)
第五章 电磁学实验	(94)
电磁学实验基础知识	(94)
一、电流的测量	(94)
二、电压的测量	(97)
三、电阻的测量	(98)
四、常用电学仪器简介	(98)
五、电学实验的一般操作规程	(101)
实验13 用伏安法测量未知电阻	(101)
实验14 磁电式电表的改装与校准	(103)
实验15 万用表的使用	(104)
实验16 电桥的原理和使用	(108)
16-1 惠斯通电桥的原理与使用	(109)
16-2 双臂电桥的原理与应用	(112)
实验17 用电位差计测量电动势	(116)
实验18 灵敏电流计的研究	(120)
实验19 用模拟法测绘静电场	(124)
实验20 示波器的使用	(127)
阅读材料E 电生理技术	(134)
第六章 光学实验	(136)
光学实验基础知识	(136)
一、光学实验中常用的光源	(136)
二、光学实验的一般操作规程	(137)
实验21 薄透镜焦距的测定	(137)
实验22 用分光计测量三棱镜的折射率	(140)
22-1 分光计的调节	(141)
22-2 最小偏向角法测三棱镜折射率	(145)
实验23 液体折射率的测定	(148)

实验 24 光的等厚干涉现象与应用	(151)
实验 25 衍射光栅及其应用	(154)
实验 26 偏振光的实验研究	(156)
实验 27 旋光溶液的旋光率和浓度的测定	(161)
阅读材料 F 光学遥感	(165)
第七章 设计与研究性实验	(168)
一、研究课题的选定	(168)
二、实验方案的设计	(168)
三、科技论文写作	(168)
实验 28 测量规则圆环的密度	(171)
实验 29 用焦利氏秤测定不规则物体的密度	(171)
实验 30 用振动法测弹簧的倔强系数	(171)
实验 31 测定晶体二极管的伏安特性曲线	(172)
实验 32 简易万用表的设计	(173)
实验 33 用 UJ36 型电位差计测铜的电阻率	(174)
实验 34 直流电源负载特性的研究	(174)
实验 35 整流滤波电路的设计	(175)
实验 36 用劈尖干涉法测定微小厚度	(176)
实验 37 用牛顿环测定溶液的折射率	(176)
实验 38 白光干涉及物质折射率的测定	(176)
实验 39 用折射极限法测液体的折射率	(177)
第八章 综合与技术性物理实验	(179)
实验 40 温度传感器特性与温度控制的研究	(179)
40-1 热敏电阻的电阻温度关系的研究	(179)
40-2 热敏电阻在温度测量中的应用	(184)
40-3 电接点水银温度计在恒温控制中的应用	(187)
实验 41 RC 电路的充放电过程	(191)
实验 42 用示波器测绘铁磁材料的磁化曲线	(195)
实验 43 用霍尔元件测磁场	(198)
43-1 霍尔效应及其测量磁场	(199)
43-2 圆线圈和亥姆霍兹线圈的磁场分布	(203)
实验 44 电子束的偏转与聚焦	(206)
实验 45 RLC 电路功率因数的实验研究	(213)
实验 46 电动机的原理和特性测试	(215)
实验 47 变压器的原理与变比测试	(219)
实验 48 迈克尔逊干涉仪	(222)
48-1 迈克尔逊干涉仪的调整与使用	(222)
48-2 干涉法测定固体的线膨胀系数	(226)
实验 49 光电效应及普朗克常数的测定	(229)
实验 50 黑白摄影及扩印技术	(232)

50-1 摄影	(232)
50-2 印相和放相	(236)
实验 51 全息照相的基本技术	(238)
实验 52 光谱分析技术	(243)
52-1 用棱镜摄谱仪研究氢光谱	(243)
52-2 光栅光谱仪的原理与使用	(246)
52-3 测定叶绿素的吸收光谱特性	(251)
实验 53 密立根油滴实验	(254)
阅读材料 G 激光应用	(258)
阅读材料 H X 射线	(260)
附录	(263)
附录 I 国际单位制 (SI)	(263)
附录 II 常用的物理常数	(264)
附录 III 科学型计算器统计功能简介	(266)
参考文献	(268)

绪 论

一、大学物理实验的地位和作用

物理学是一门实验科学。物理规律的发现和物理理论的建立,都必须以严格的物理实验为基础,并受到实验的检验。例如,落体运动是人们司空见惯的物理现象。但在16世纪以前,由于缺乏实验手段而被亚里士多德的错误论点(即物体越重下落速度越快)统治了1800多年。直到伽利略作了科学史上著名的斜面实验,才发现了落体运动的规律;又如,电磁感应现象是法拉第在实验中发现并经过无数次实验才于1831年提出了著名的电磁感应定律,为现代大规模的电力工程奠定了基础;再如,人们通过杨氏的干涉实验认识到光的波动性,而通过赫兹的电磁波实验,进一步认识到了光是一种电磁波,使麦克斯韦的电磁场理论获得普遍的承认。之后又通过对黑体辐射和光电效应等实验的研究,发现了光具有粒子性。从而得出了光具有波、粒二象性的结论等。因此,物理实验在物理学的创立和发展,乃至自然科学及技术的发展中占有十分重要的地位。

作为一门系统地进行实验技术基础训练的实验课——大学物理实验,有着丰富而广泛的内容,在培养学生科学实验能力的全过程中,起着重要的基础作用。本课程的教学目的和任务是:

(1)培养学生严肃认真的工作作风,实事求是的科学态度,爱护国家财产,遵守纪律的优良品德。

(2)在一定的物理知识和中学物理实验的基础上,对学生进行科学实验方法和实验技能的基础训练。通过对本课程的学习,要求学生掌握研究各种不同自然现象的基本实验方法和理解物理思想;了解并掌握一些常用物理量的测量方法;熟悉并掌握常用实验仪器的基本原理、性能和使用方法;学会正确记录、处理实验数据,分析判断实验结果和撰写比较完整的实验报告。

(3)初步培养学生独立进行科学实验研究的能力。即培养学生全面、细致和深入观察实验现象及定性或定量分析,判断实验误差和实验结果的能力;动手操作、调节仪器和精确测量的独立工作能力;具备初步设计、拟定实验方案,研究简单物理现象的实验能力。

二、大学物理实验课的基本程序

实验教学的过程实际上是在教师指导下由学生通过阅读实验教材及必要的参考书,独立思考,独立操作而完成的。根据这一特点,实验课的教学程序可分为以下3个阶段:

1. 课前预习

课前预习是做好实验的前提。通过预习,要求搞清本次实验的目的、要求、原理和实验过程的基本思路。如观察什么现象,测量哪些物理量,用什么仪器,怎样测量等等。在此基础上写出预习报告(可作为实验报告的前半部分)。预习报告的内容包括:实验名称、目的、所用仪器、原理、实验的大致步骤,并设计好测量数据表格。实验原理要用自己的语言扼要说明实验所依据的原理和必要的公式以及电路图、光路图等,切不可简单照抄实验讲义。

2. 课堂实验

进入实验室后,要自觉遵守实验室的规则,认真听取教师的指导和提出的要求。操作前必须先认识和熟悉仪器,了解仪器的使用方法及注意事项,然后再进行正确的调整和使用。实验时要按步骤进行,能较好地控制实验的物理过程和物理现象,认真观察现象,正确记录数据。实验中若有仪器损坏或出现故障,要及时请教教师,不得随意处理。测量完毕,将测量结果请教师审阅认可后才能结束实验。最后将仪器整理复原,养成良好的实验习惯。

3. 写实验报告

写实验报告是学生对实验进行总结、巩固和深化的过程,要独立完成,不得涂改数据。实验报告力求简单明了,用语确切,字迹清楚,图表正确以逐步培养综合分析和总结的能力。

实验报告包括以下内容:

- (1)实验名称、日期、实验者姓名。
- (2)实验目的。
- (3)实验器材:仪器的名称、规格和型号,主要材料。
- (4)实验原理:简明扼要地写明实验的原理和有关公式(光学实验要画出光路图,电学实验要画出电路图)。
- (5)实验步骤:根据实验内容和仪器的操作规程,写出实验操作的简要步骤。
- (6)实验数据记录:包括与实验有关的环境条件(如大气压力、环境温度、电磁场分布等)和原始数据表格。具体要求见本书第一章第四节中的“实验记录与数据列表”。
- (7)实验数据处理:包括对平均值、误差的计算(要求写出主要的计算公式和必要的计算步骤)、实验图线及实验结果的正确表达。
- (8)误差分析:找出影响实验结果的主要因素,从而采取相应的措施以减小误差。对于不同的实验,因所用实验仪器、实验方法或所测量的物理量不同,误差分析的方法也不尽相同。当误差过大时,分析原因后,要对误差作出合理的解释。
- (9)问题讨论:包括回答思考题,实验过程中观察到的异常现象及其可能的解释,对实验装置和实验方法的改进意见及实验的心得体会等。该项内容不要求每个实验都写,有则写,无则不要勉强。

第一章 实验误差与数据处理

任何科学实验都要对测量得到的大量数据进行分析 and 处理才能得到实验的结果, 所以具有对实验数据分析和处理的能力是所有科学工作者必备的素质。大学物理实验是对大学生进行系统实验训练的开始, 培养学生初步掌握实验数据的分析和处理方法就成为本课程的主要任务之一。本章主要介绍实验误差的基本概念、用不确定度评定实验结果和一些最基本的数据处理方法。由于这些内容牵涉到较多的统计学和计量学的内容, 我们只能注重介绍一些基本概念, 引用其中的某些结论和计算公式, 深入的讨论和证明可阅读有关计量学和数理统计的书籍。

第一节 测量及其有效数字

一、测量与单位

物理实验是以测量为基础的。研究物理现象、探索物理规律、了解物质特性、验证物理原理都需要进行测量。所谓测量, 就是将待测的物理量直接或间接地与另一个同类的被选作为标准的量进行比较, 其倍数即为该物理量的量值, 而被选定的标准量则为该物理量的单位。因此, 对一个物理量测量的结果, 总是由数值和单位组成, 两者缺一不可。

测量的单位采用 1960 年第十一届国际计量大会所制定的国际单位制(简称 SI 制), 以米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(A)、开尔文(K)、摩尔(mol)和坎德拉(cd)为国际单位制的基本单位(其定义详见附录 I), 分别对应的物理量是长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和发光强度。其他物理量的单位均可由这些基本单位导出, 称为国际单位制的导出单位。

二、有效数字

测量所得数值的位数由被测量和量具决定。例如, 米尺的最小分度是毫米, 用它测量某物体 A 的长度, 若发现 A 比 143mm 长约半个刻度, 则测量结果可以记为 143.5mm。在这四位数字中, 143 三位数字是准确读得的, 因此是可靠的, 称之为可靠数字。而 5 这一位是估计出来的, 若换一人来读数, 也可能估计成 4 或 6, 称这样的数字为可疑数字(或估计数字)。可见, 测量得到的数值总是由数位可靠数字和最后一位可疑数字组成, 我们把这样的数字称为有效数字, 其位数称为有效位数。如上例中的有效位数为 4 位。如果采用最小分度为 1cm 的米尺测量上述物体的长度, 则结果就可能是 14.3cm, 其中最后一位 3 是估读的, 结果的有效位数为 3。

显然, 有效数字的位数可反映测量的精确程度, 有效数字的位数愈多, 测量的精确度愈高。所以, 在测量读数及数据记录时必须注意下列一些问题。

(1) 估读问题。对于一般分度式仪表, 必须估读到最小刻度的下一位, 即使该位的估读值为“0”, 也必须读出。如用最小分度值为 1mm 的钢制米尺测某物体的长度, 若它的末端正好与 124mm 刻线相重合, 这时, 必须把测量结果记为 124.0mm, 而不是 124mm。估读时, 一般估读最小刻度的十分之一。但有些仪器的分度较窄, 而指针较宽, 有些仪器的最小分度为 0.5、0.2, 此时根据实际情况, 估读最小刻度的五分之一, 甚至二分之一即可。

对于游标分度的仪表, 读数时判断主副尺的刻线对齐就相当于估读, 即估读位就是游标的最小分度值所在的那一位。

(2) 单位换算问题。有效位数不能因单位换算而改变。例如, 10.50mm 是 4 位有效数字, 若改用 m 作单位, 则应记为 0.01050m, 这时有有效数字的位数仍为 4 位。由此可见, 第一个非零数字之前的“0”(用以表示小数点的位置)不是有效数字, 而在非零数字之间或之后(包括小数点后数字末尾)的“0”都是有效数字。

要避免把上例中的长度写成 $10500\mu\text{m}$, 因为这样无故增加了有效数字的位数。而应用科学记数法表示为 $1.050 \times 10^4 \mu\text{m}$ 。

(3) 舍入问题。有效数字运算时, 经常涉及数据尾数的舍入问题。由于“四舍五入”的规则是“见五就入”, 这会使 1~9 的 9 个数字中, 入的机会大于舍的机会, 因而不合理的。现在通用的规则是: 对末尾多余的数字, 小于 5 则舍, 大于 5 则入, 等于 5 则把所保留的末位凑成偶数。即“4 舍 6 入 5 凑偶”。如 12.425 取四位有效数字为 12.42, 1.535 取三位有效数字为 1.54。

在进行实验数据的处理时, 有效数字运算的结果仍为有效数字, 其有效位数由结果的不确定度确定(后面介绍), 在不要求计算不确定度时, 可按可靠数字与可疑数字, 或可疑数字与可疑数字运算, 其结果为可疑数字的原则, 粗略确定结果的有效位数。下面具体分析各基本运算的运算规律。

(1) 加、减运算:

例如, $97.4 + 6.238 = 103.638$ $26.2 - 3.926 = 22.274$

运算结果分别为 103.6 和 22.3。可见, 两个或两个以上的有效数字相加、减时, 所得结果的可疑数字位置, 与所有参与运算的各量中可疑数字位置最高的一个相同。

(2) 乘、除运算:

例如, $13.6 \times 1.6 = 21.76$ $376.1 \div 13.6 = 27.654\cdots$

运算结果应分别为 22 和 27.6。由此可见, 有效数字相乘、除时, 其结果的有效位数与参与运算的各数字中有效位数最少者相同。

(3) 函数运算:

诸如乘方、开方、三角函数和自然对数等函数运算结果的有效位数, 一般可取与自变量的有效位数相同。如 $\ln 13.24 = 2.583$, $\sin 20^\circ 6' = 0.3437$ ($20^\circ 6'$ 可看作 $20^\circ 06'$, 4 位有效数字)。

(4) 混合运算:

在进行混合运算时, 必须注意以下 3 点。

① 在运算关系中的常数, 如 π , $\sqrt{2}$, 2, $1/2$ 等都是准确数, 不影响结果的有效位数。但对于其中的无理数, 如 π , $\sqrt{2}$ 等, 在具体运算时, 所取位数应足够多(至少应比结果的位数多取一位), 以免引入舍入误差。

② 在混合运算中, 如果是单纯的乘除运算, 结果的有效位数一般取参加运算的诸数中

位数最少者的位数。如果同时含有加减运算时，则应特别注意加减运算对结果有效位数的影响。例如算式

$$(11.27 - 10.89) \times 2750 \div 113.7 = 0.38 \times 2750 \div 113.7 = 9.2$$

从参加运算的四个数据看，似乎应保留四位有效数字，实际上只能保留两位。如果在上面的式子中以 $(11.27 - 0.89)$ 代替因子 $(11.27 - 10.89)$ ，虽然0.89只有两位有效数字，但差值为四位，所以结果应为四位有效数字。

③ 运算的中间结果应多保留一至两位可疑数字，以避免舍入误差的积累。

由以上有效数字的运算规律可见，对不同准确度的数字进行运算时，其结果的有效数字位数应取得恰当。取少了会带来附加误差，降低结果的精确程度。取多了，从表面上看似乎精度很高，实际上毫无意义，反而给人以错误的印象和带来不必要得繁复。

三、测量的分类

测量可分为直接测量和间接测量两种。凡使用测量仪器能直接测得结果的测量，如用米尺测量物体的长度，用秒表测量时间，用电表测量电流、电压等，就是直接测量。但对大多数的物理量来说，是不能用仪器直接测得的，而是需要先直接测量一些与之相关的物理量，然后由待测量与这些量之间的数学关系，经运算后才能得到结果，这种测量叫做间接测量。如用单摆法测量重力加速度，可先测出摆长 L 和摆的周期 T ，然后由 $g = 4\pi^2 L / T^2$ 计算而得到。显然，直接测量是间接测量的基础。

随着实验技术的发展，很多原来只能间接测量的物理量，都可以转化为直接测量。例如速度、磁感应强度等的测量，现在传感技术、CCD技术和计算机的应用更使得对大部分的物理量进行直接测量变为现实。

测量又可分为等精度测量和不等精度测量。对某一物理量 x ，我们重复测量 n 次，它的值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。如果每次测量的条件都是相同的，则我们没有理由认为所测量的值中某一个值更精确些，或不精确些，这就是等精度测量。比如，我们在完全相同的条件下，用米尺测量某铜棒的直径若干次，这就是等精度测量。

如果每次测量的条件是不同的，如实验者、仪器、方法、环境等不同，那么各次测量值的精确度是不同的，这就是不等精度测量。比如用游标卡尺和螺旋测微计测量同一铜棒的直径，显然两种仪器测量得到的值，其精确度是不同的，这就是不等精度测量。

一般来讲，保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的，但当某些条件的变化对结果影响不大时，可视为等精度测量。所以绝大部分情况下对一个量的多次测量都可认为是等精度测量。对于不等精度测量，由于数据处理比较繁杂，一般情况下不采用。

第二节 实验误差与不确定度

一、实验误差的概念

任何测量都不可能做到绝对准确，这是由于所用测量器具都不可能做到完美无缺；实验者的操作、调整和读数，不可能做到绝对无偏差；环境条件的变化，诸如温度的波动、机械的振动、电磁辐射的随机变化等，也将不可避免地会造成各种干扰。这就使得测量的结果必然存在一定的误差。

如果我们用 x_0 表示被测物理量在一定客观条件下的真实大小, 称为该物理量的“真值”。如果用 x 表示实际测量得到的测量值, 那么 x 与 x_0 间的差, 就称为“测量误差”。我们把绝对差值

$$\delta_x = |x - x_0| \quad (1-1)$$

定义为测量的绝对误差, 而把相对差值

$$E_r = \frac{\delta_x}{x_0} \times 100\% \quad (1-1a)$$

定义为测量的相对误差。显然, 绝对误差与相对误差的大小, 反映了测量结果的准确程度。

在比较两个测量结果的优劣时, 如果被测量相同, 则绝对误差的大小即可说明测量准确度的高低。但对于不同的被测量, 不仅要看绝对误差的大小, 而且还要看被测量本身的大小, 即用相对误差来评价更确切。例如, 在测量两个物体的长度时, 假设两个物体的真实长度分别为 23.50cm 和 2.35cm, 测量得到的结果分别为 23.53cm 和 2.32cm, 单从绝对误差看, 一个测得值大了 0.03cm, 一个测得值小了 0.03cm, 好像两个测量的准确度相同。其实不然, 因为第一个测量的相对误差为 $E_r = \frac{0.03}{23.50} \times 100\% = 0.2\%$, 而第二个测量的相对误差为 $E_r = \frac{0.03}{2.35} \times 100\% = 2\%$, 这就很明显地说明, 第一个测量要比第二个测量的准确度高。可见, 在表示一个测量结果的准确度时, 不仅要写出测量的绝对误差, 而且还要写出测量的相对误差。

二、实验误差分析

由以上讨论可知, 测量值并不等于真值。分析测量存在误差的原因可能有四个方面的影响: 测量仪器、测量方法、测量者个人和测量环境。

(1) 测量仪器对测量结果的影响。测量仪器在测量中是通过刻度尺(或数字显示)来提供标准量的, 但这种标准量只能是法定标准的复制品并非真正标准, 它与法定标准必有一定差距。而且仪器在设计、选材、加工、装配过程、使用环境的变化以及使用条件是否满足都有可能造成仪器标准量与法定标准的偏差。因此, 我国国家计量局对测量仪器的最大允许偏差(简称最大允差, 也称极限误差或公差)有具体的规定, 如 150mm 的钢板尺的最大允差为 $\pm 0.10\text{mm}$; 量程为 125mm、分度值为 0.02mm 的游标卡尺, 最大允差为 $\pm 0.02\text{mm}$ 等, 其他仪器的最大允差参见表 2-1。

此外, 长期使用的磨损、老化, 零点的漂移, 都可能使测量产生误差。

(2) 测量方法对测量结果的影响。采用不同的测量方法可能导致不同的测量结果, 其影响是很明显的。例如, 为了测量电阻, 用伏安法和用电桥测量的结果往往就不一样; 测量某种材料的膨胀系数, 用一般的光杠杆法测量和用干涉法测量, 其结果也不一样; 测量重力加速度时, 用测单摆周期的方法和用自由落体的方法其结果也可能不同。

分析测量方法不同导致产生不同误差的原因, 一方面是所用的仪器不同; 另一方面是测量方法本身的问题, 如测量方法所依据的原理不够完善或理论公式本身带有一定的近似性, 实验条件达不到理论公式所规定的要求等, 这些都会引入不同的误差。例如, 单摆的周期公

式 $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ 成立的条件是摆角趋于零, 摆线的质量、摆球的体积为零, 空气对摆的浮力

和阻力忽略等, 这些实验中是达不到的。又如在热学实验的理论公式中没有把散热问题考虑在内, 在电学实验的理论公式中没有把接线电阻和接触电阻考虑在内等。

(3) 实验者对测量的影响。由于实验者感觉器官的差异和对实验技术的熟练程度, 甚至性格的不同或者个人不正确的习惯都有可能造成测量结果的不同。如有的人按秒表时总是提前, 而有的人总是落后。这种误差往往因人而异, 并与实验者当时的心理、生理因素有关。

(4) 测量环境对测量的影响。测量环境变化, 如温度、湿度、气压、电磁干扰、外来的振动、供给电源的变化、空气流动、光照变化……, 不仅要使测量仪器造成影响, 同时对被测量的干扰也是不能忽略的。

实验工作的任务之一就是设法消除或减小以上各种原因造成的误差, 使实验得到的结果更接近于客观实际。因此, 在设计实验时就应对所选方案进行分析, 根据误差产生的原因选择合适的实验方法、改进实验装置、实验原理中引入修正项、采取一些特殊的测量技术(如交换法、补偿法等, 参见第二章有关内容)、控制测量环境、训练实验者的素质、对可确定的误差引入修正值、采用合理的数据处理方法(参见本章第四节的内容)等使实验误差尽可能地减到最小。例如, 对定值误差一般采用校正仪器零点或引入修正量; 对一些规律已知的积累性误差则引入修正系数, 如米尺的膨胀系数; 对一些具有特定规律的误差, 则可作出其校准曲线, 如温度计的校准曲线; 对方法误差, 大多采用修正理论公式的方法, 如为消除单摆摆角对周期产生的误差, 将周期公式修正为 $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g} \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta}{2}\right)}$, 后, 可减小 θ 对 T 的影响等。

总之, 实验误差分析是一项复杂的工作, 这就要求实验工作者必须经常总结, 掌握各种不同原理的测量仪器、各种实验方法、各种环境因素引起的误差的规律, 以提高实验技术素养。

三、不确定度与置信概率

由于测量仪器和测量者以及外界干扰(环境的变化)等不确定因素对测量结果的影响, 即使采用正确的测量方法, 所得到的测量结果仍不可能是绝对准确的, 它必然存在不确定的成分。为了表征测量结果的不确定程度, 现在国际上公认的方法就是用“不确定度”来评定。

1. 不确定度

不确定度(uncertainty)是测量不确定度(expression of uncertainty in measurement)的简称, 是表征被测量真值在某个量值范围的一个评定, 是评价测量结果优劣的一个参数。在测量方法正确的情况下, 不确定度愈小, 所述结果与被测量真值越接近, 表明测量结果愈可靠; 反之, 不确定度越大, 测量结果的可靠性越低。在报告物理量的测量结果时, 必须给出相应的不确定度, 一方面便于使用它的人评定其可靠性, 另一方面也增强了测量结果之间的可比性。

测量不确定度的估计值以标准偏差(关于“标准偏差”的意义请阅本章末的阅读材料 A)表示, 因而也称为标准不确定度(Standard uncertainty), 常记为 u 。如果 x 为测量值, 则

$$\text{测量结果} = x \pm u \quad (P = 0.683) \quad (1-2)$$

表明被测量的真值包含在 $(x + u, x - u)$ 范围内的概率为 0.683。

依照相对误差的定义, 可定义相对不确定度