



天津市高校“十五”规划教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

钟 鼎 主编



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

天津市高校“十五”规划教材

大学物理实验

钟 鼎 主编



内容简介

本书是为培养 21 世纪栋梁之才而精心设计的适应实验室开放教学需要的大学物理实验教材。在知识结构编排方面力图展现给读者一个相对完整的实验物理学全貌;在基础和预备知识内容选材方面力求充实和实用。

全书共四篇十三章,内容包括实验数据处理、力学实验、热学实验、电磁学实验、光学实验、近代实验、计算机实验数据处理、基础物理实验的测量方法、基础物理实验仪器操作技法、物理实验仪器使用和维修的基本知识、设计性和综合性实验以及数字图像采集及处理技术。

本书可作为高等学校理工科各专业教科书或参考书,并可供不同层次的教学选用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/钟鼎主编. —天津:天津大学出版社,
2006.3

ISBN 7-5618-2231-6

I. 大... II. 钟... 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(2006)第 004942 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
网 址 www.tjup.com
短信网址 发送“天大”至 916088
印 刷 天津市宝坻区第二印刷厂
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 260mm
印 张 24.5
字 数 612 千
版 次 2006 年 3 月第 1 版
印 次 2006 年 3 月第 1 次
印 数 1 - 3 000
定 价 40.00 元

前 言

物理实验以独立课程亮相于基础课舞台还是从 20 世纪 70 年代末开始的。物理实验不仅是物理专业的基础课程之一,而且成为理工科、文科学生的全面系统和独立设置的必修实验课程。物理实验的任务是通过实验培养学生观察、发现、分析、归纳、统计的能力,让学生系统地掌握实验物理的基本知识、基本方法和基本技能。现在,人们已经认识到实验物理技术的重要性和加强对学生进行实验物理知识系统训练的必要性,因此,物理实验独立设课是时代的必然产物。

本书根据物理实验教学要求,以培养 21 世纪创新人才为目标和出发点,在重视传授知识的同时,更加注重能力、素质和创新意识的培养,加强实验技能训练。本书涵盖了作者多年的实验教学实践,是在原有实验讲义的基础上修改而成的。为了使学能系统地掌握实验物理的基本知识和基本方法,本书将不确定度及数据处理等预备知识放在前面集中介绍,旨在尽早清除后续实验过程中的理论障碍。因此,本书用了较多篇幅进行介绍,并且在不同的实验题目中对测量误差的估计和数据处理方法提出了不同的要求,为学生进一步理解、掌握误差理论提供方便。

本书在编写过程中,首先注意到物理实验课程是系统培养实验物理学知识、方法和技能的独立课程,该课程是以独立设课和开放式的教学为特征,因此教材体系的系统性和完整性显得十分必要。本书主要内容包括测量误差及数据处理的基本知识以及力学、热学、电磁学、光学和近代物理实验中的基础实验。其次,遵循实验认知能力和创新能力培养的规律性,本书对基本知识、基本仪器、基本方法和基础仪器维护知识等部分内容力求系统、详细介绍,并按不同层次由易到难,逐步加强对知识的灵活应用和能力的综合训练。第三,注重实验教学的各个环节,每个实验都编写了思考题,促使学生认真准备积极思考,加深理解实验目的、原理等内容。第四,注意用计算机处理数据在实验教学中的广泛应用,并自行研制了实验数据处理软件。该软件可以将常见实验数据处理智能化和结果图形化。

本书由钟鼎编写绪论、第八章、第九章、第十章、第十一章;许伯章编写第一章;许伯章、康志泰、钟鼎、张岷、张保利和郭文祥、吕江、李凤艳编写第二章;许伯章、张岷、郭文祥、吕江、李凤艳编写第三章;张保利、许伯章、沈寿义、张岷、康志泰、张凤敬、郭文祥、吕江、李凤艳编写第四章;许伯章、康志泰、张大素、张保利、钟鼎编写第五章;钟鼎、许伯章、吕江、李凤艳编写第六章;李洁编写第七章、第十二章和第十三章;刘毅、吕江编写附录并负责全书的组织工作;许伯章负责书稿整理工作;赵树魁负责全书的审稿和统稿工作。

本书是天津市高校“十五”规划教材,并受到学校重点课程建设专项经费的资助,同时得到了各界领导和友好人士的热情鼓励与帮助,编写中还参考了许多院校的有关教材,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,书中难免存有缺点和错误,敬请读者批评指正。

编者

2005 年 10 月

目 录

绪论	(1)
第一篇 基础实验	(3)
第一章 实验数据的处理	(3)
第一节 实验不确定度的评定	(3)
第二节 实验数据处理的基本方法	(9)
第二章 力学实验	(16)
实验一 长度测量	(16)
实验二 物体密度的测定	(21)
实验三 重力加速度的测定	(25)
实验四 单摆实验	(28)
实验五 用拉伸法测金属丝的杨氏模量	(31)
实验六 动态悬挂法测弹性模量	(34)
实验七 用迈克耳孙干涉仪测量杨氏模量	(38)
实验八 刚体转动实验	(40)
实验九 用三线摆测量转动惯量	(43)
实验十 验证动量守恒定律	(47)
实验十一 验证机械能守恒定律	(50)
实验十二 简谐振动的研究	(51)
实验十三 弦的振动实验	(55)
第三章 热学实验	(59)
实验一 测定空气的比热容比	(59)
实验二 电热法测定水的比热容	(62)
实验三 测定冰的熔解热	(64)
实验四 用电热法测定热功当量	(66)
实验五 用冷却法测量金属的比热容	(68)
实验六 用落针法测量液体黏度	(71)
实验七 用转筒法测量液体的黏度	(74)
实验八 用拉脱法测量液体的表面张力系数	(76)
第四章 电磁学实验	(79)
实验一 电磁学实验常用仪器	(79)
实验二 示波器的使用	(84)

实验三	温差电偶的定标	(90)
实验四	电表的改装和校准	(92)
实验五	设计和组装欧姆表	(94)
实验六	数字万用表	(97)
实验七	灵敏电流计	(99)
实验八	用惠斯通电桥测电阻	(103)
实验九	直流电位差计	(107)
实验十	用稳恒电流场模拟静电场	(113)
实验十一	用霍尔元件测磁场	(117)
实验十二	磁性材料的基本磁化曲线及磁滞回线的测定	(122)
实验十三	用冲击电流计测磁场	(127)
实验十四	用冲击电流计测电容和高电阻	(130)
实验十五	RC 电路的充放电过程	(132)
第五章	光学实验	(136)
实验一	薄透镜焦距测定	(136)
实验二	薄透镜焦距测定及自组显微镜、望远镜	(139)
实验三	双棱镜的干涉	(145)
实验四	等厚干涉——牛顿环、劈尖干涉	(148)
实验五	单缝、单丝衍射实验	(154)
实验六	分光计的调节和三棱镜折射率的测定	(157)
实验七	衍射光栅	(162)
实验八	超声光栅测声速实验	(165)
实验九	光偏振现象的研究	(170)
实验十	照相技术	(174)
实验十一	全息照相(一)	(179)
实验十二	迈克耳孙干涉仪	(186)
第六章	近代实验	(190)
实验一	光电效应和普朗克常数的测定	(190)
实验二	密立根油滴实验	(192)
实验三	弗兰克-赫兹实验	(197)
实验四	全息照相(二)	(199)
实验五	平行光管的调整及使用	(202)
实验六	真空的获得与测量	(206)
第二篇	实验基本技能综述	(212)
第七章	计算机处理实验数据	(212)
第一节	Basic 语言处理实验数据的方法	(212)
第二节	Visual Basic 语言处理实验数据的方法	(218)
第三节	Microsoft Office XP Excel 处理实验数据的方法	(236)
第八章	基础物理实验的测量方法	(243)

第九章 基础物理实验仪器操作技法	(250)
第一节 仪器调整与操作技术	(250)
第二节 电磁学实验基本操作规则	(253)
第三节 光学实验基本操作规则	(253)
第十章 电子仪器使用和维修的基本知识	(255)
第一节 电子仪器维护的基本知识	(255)
第二节 电子仪器故障检修的基本方法	(257)
第三节 常用的 10 种故障排除方法	(258)
第四节 元器件的一般检查方法	(261)
第五节 万用表的使用	(263)
第三篇 设计性和综合性实验	(266)
第十一章 设计性和综合性实验	(266)
第一节 力学设计实验	(266)
第二节 热学设计实验	(271)
第三节 电学设计实验	(273)
第四节 光学设计实验	(283)
第五节 综合设计实验	(286)
第四篇 数字图像采集及处理技术	(290)
第十二章 数码相机简介	(290)
第一节 Olympus 300 Digital 相机简介	(290)
第二节 拍摄	(293)
第三节 播放	(297)
第四节 图像传送	(298)
第十三章 数字图像处理	(301)
第一节 图像处理基础	(301)
第二节 Photoshop 7.0 简介	(306)
第三节 Photoshop 图像处理	(320)
附录 A 中华人民共和国法定计量单位	(360)
附录 B 常用物理数据	(362)
附录 C 常用电气测量指示仪表和附件的符号	(369)
附录 D 示波器及其使用	(372)
附录 E DDJ-III 型电脑多功能计时器使用说明	(377)
附录 F 正态分布与标准偏差	(379)
附录 G t 因子	(381)

绪 论

物理实验学是理工科大学生必修的基础实验课程之一。探索物理规律多以实验事实为基础,并且不断受到实验的检验修正。在物理学的发展中物理实验一直起着重要的作用,以至于在探索和开拓交叉学科领域时,物理实验技术仍然是最有效的工具。在高等教育中物理实验是对学生系统讲授物理实验方法和训练实验基本技能的一门重要课程。通过学习物理实验,不仅可以加深对物理理论的理解,更重要的是使学生能获得基本的实验知识、实验方法,掌握基本的实验操作技能,并且能在实验方法和技能方面得到较为系统、严格的训练。换言之,物理实验课是大学学习或从事科学实验的起点,在培养科技工作者的良好科学素质及科学世界观方面起着不可替代的作用。因此,学好物理实验对于高等院校的学生十分重要。

一、物理实验课的目的

①通过对物理实验现象的观测和分析,学习运用理论指导实验,分析和解决实验中遇到问题,并从实际应用中加深对理论的理解。

②培养学生从事科学实验的基本技能。这些技能包括:通过检索和阅读资料,概括出实验原理和自行设计实验的方法;正确使用基本实验仪器,掌握基本物理量的测量方法和实验操作技能;正确记录和处理数据,分析实验结果和撰写实验报告,完成实验的全过程等等。

③培养学生实事求是的科学态度和严谨踏实的工作作风,以及勇于探索、坚韧不拔的钻研精神和遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品德。

二、物理实验课的主要教学环节

为达到物理实验课的目的,学生应重视以下三个重要环节。

1. 实验预习

课前要仔细阅读实验教材和相关的背景资料并通过仿真实验等手段,弄清实验所用原理、使用的仪器、实验方法、实验条件及实验关键步骤等,根据实验要求画好记录数据的表格。有些实验还要求学生课前自拟实验方案,自己设计线路图或光路图,自拟数据表格等。因此,课前预习是实验过程能否顺利进行的关键环节。

2. 实验操作

学生进入实验室后应遵守实验室的规章制度。要像一个科学工作者那样严格要求自己,实验前先熟悉仪器、了解仪器使用方法,然后进行仪器、仪表的安装与调整。仪器布置要有条理,便于操作。注意安全操作,细心观察实验现象。认真钻研和探索实验中遇到的问题。如遇到问题,应视为学习的良机,冷静地分析和处理。仪器发生故障时,要请示指导教师,在教师指导下学习排除故障的方法。总之,要把着重点放在培养实践能力上,而不是测出几组实验数据就算完成任务了。

对实验数据要严肃对待,学生要用钢笔或圆珠笔将原始数据记录在记录纸上。如确系记

录错误,也不要涂改,应轻轻画上一道,在旁边写上正确值(错误多的,须重新记录),使正误数据都能清晰可辨,以供在分析测量结果和误差时参考。不许用铅笔记录,也不允许先记在另外的草稿纸上再誊写在数据记录纸上,这样容易出错,况且这已不是“原始数据”了。希望同学注意纠正自己的不良习惯,从一开始就不断地养成良好的科学作风。有条件的实验室可以先用数据处理软件进行预处理,确认无误后再将实验数据送交教师审阅签字,然后整理还原仪器,经教师允许后方可离开实验室。

3. 实验总结

实验后要及时对实验数据进行处理。如果原始记录删改较多,应加以整理,对重要的数据要重新列表。数据处理过程包括计算、作图、误差分析等。计算要有计算式(或计算举例),代人的数据都要有根据,便于别人看懂,也便于自己检查。作图要按作图规则进行,图线要规整、美观,并符合国家标准。数据处理后应给出实验结果。最后要求撰写出一个字迹清楚、文理通顺、图表正确、数据完备、结果明确、有独到见解的实验报告。

实验报告内容如下:

- ①实验名称;
- ②实验目的;
- ③实验仪器,要记录仪器的规格型号、生产厂家和厂家的编号以及实验室编号等;
- ④实验原理,简要叙述有关物理课程内容(包括电路图或光路图或实验装置示意图)及测量中依据的主要公式、式中各量的物理含义及单位、应满足的实验条件等;
- ⑤实验步骤,根据实际的实验过程写明关键步骤和安全注意要点;
- ⑥数据表格与数据处理,数据表格要完整,要有物理量的名称和单位以及运用的计算公式和实验条件等,要进行计算(在实验报告中要有关键的计算过程)、画出曲线图和分析误差,最后写出实验结果;
- ⑦小结或讨论,可以是实验中实验现象的分析、对实验关键问题的研究体会、实验的收获和建议以及解答思考题等;
- ⑧附件,实验时的原始数据记录一份。

三、实验室规则

- ①学生进入实验室必须带上预习报告(说明完成了指定的实验前预习内容。课前不作预习,不准参加实验课)和记录实验数据的表格,经指导教师检查同意后方可开始实验。
- ②遵守实验室规则,确保实验环境安静和整洁。
- ③经过教师检查线路无误后方可接通电源。
- ④在实验室内不得擅自置换仪器,实验中严格按仪器说明书操作,如有损坏应赔偿。公用工具用完后应立即放回原处。
- ⑤实验完毕,经教师认可测量数据并签字后,学生应将仪器整理还原,将台面和附近实验区收拾整齐。经教师检查仪器还原情况后方可离开实验室。
- ⑥实验报告应在实验后一周内交到实验室指定地点。

第一篇 基础实验

第一章 实验数据的处理

做物理实验的目的是探寻和验证物理规律,而许多物理规律是用物理量之间的定量关系表述的。在物理实验中可以获得大量的测量数据,这些数据必须经过认真、正确、有效的处理,才能得出合理的结论,从而把感性认识上升为理性认识,形成或验证物理规律。所以,数据处理是物理实验中一项极其重要的工作。本章介绍一些最基本的数据处理方法,包括误差分析、不确定度评定、有效数字表示法及作图拟合法等。

第一节 实验不确定度的评定

一、实验误差分析

客观上一个待测物理量的大小有一个真实的数值,叫做“真值”。由于测量方法、测量仪器、测量条件及测量者不同,实际测得的数值(测量值)只能是真值的近似值。测量值与真值之差称为误差。对测量方法的考虑、测量仪器的选择、测量条件的确定、测量数据的处理等等都应在可能的范围内力求减少误差。

所谓测量,就是由测量者采取某种测量方法、用某种测量仪器将待测量与标准量进行比较的过程。例如,为测量一个铁球的质量,可以用天平(测量仪器)把铁球(待测物)放在天平的一侧,把适量的砝码(其质量为标准量)放在另一侧,适当调节天平而使两侧平衡时(测量方法),即可得到待测物的质量,即待测量。由此可知,测量值并不等于真值,测量值存在误差的原因可能是测量仪器、测量方法或测量者引起的。现分述如下。

1. 测量仪器

在许多情况下,测量仪器上的刻度(或数字显示)就代表了标准值,如米尺、温度计上的刻度等。但是这种“标准量”并非真正标准,它与真正的标准必有差距。例如,米尺的两端会有磨损、刻度的不均匀或不够准确、在不同温度下米尺本身的长度有变化等。

2. 测量方法

采用不同的测量方法往往会得到不同的测量结果。例如,为了测量玻璃板的温度,用一般温度计测量和用激光测量的结果就不一样;再如,为了测量重力加速度,用测量单摆周期的方法和用自由落体的方法测量出的结果也会不同。

3. 测量者

首先是“估读”的不同。当待测量位于标准量的某两刻度之间时,必须要估计其数值。不同测量者的估计值会有所不同,这与测量者的位置、熟练程度及仪器所处的环境状况等有关。其次是“判断”的不同。例如,要测量干涉条纹间的距离,为确定何处是干涉条纹的中心位置(光最亮处或最暗处),需要经验和判断能力。最后还有“误读”的可能,即测量者由于长期工作导致疲劳或精力不集中而把数据读错或记录错。

以上三方面的问题都会造成误差。其中第一种问题和第二种问题产生的误差大小与测量仪器、测量者、测量条件和测量次数有关,可以用一定的方法进行评定。这种评定的方法将在第二节详述。第三种问题中的“误读”应力求避免。测量方法的问题则要进行定性分析以尽量避免或进行定量分析予以修正。例如,要测量一块正在加热的平面玻璃的温度,无论将温度计或热电偶放在玻璃板的任何一侧,都不可能测准,因为测温元件(温度计或热电偶)与待测元件(玻璃板)的受热与散热情况都不相同,它们的温度不可能相同。因此,可以改用激光测温的方法,利用待测元件本身作为测温元件,从玻璃表面间反射光的干涉条纹变化确定温度变化,就可以避免因测温元件与待测元件的温度差而形成的误差。又如,用单摆测量重力加速度的一般公式为

$$g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2}$$

式中, T 为单摆周期, L 为摆长。这里忽略了单摆摆线的质量,忽略了单摆是非简谐振动,也忽略了空气阻力的影响等等。如要修正上述这些因素造成的误差,则要进行严格的计算和修正。如摆线质量为 μ , 摆球半径为 r , 质量为 m , 则上述公式应修正为

$$g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2} \left(1 + \frac{2}{5} \frac{r^2}{L^2} - \frac{1}{6} \frac{\mu}{m} \right)$$

当单摆摆动的幅角较大或空气的浮力与阻力的影响较大时,还应做其他修正。

实验误差的分析是一项十分重要的工作,要考虑实际上可能对测量结果产生影响的各种因素,分析影响的大小。任何实验都不要要求把一切影响因素全部消除,因为这在经济上、时间上、精力上都将造成极大的浪费,而实际上也是不可能做到的,只要在误差允许范围之内就行。而这种分析需要广博的知识、丰富的实践经验和高超的判断能力,这就要求人们在各种实验中认真思索、仔细考虑,以积累经验、丰富知识和提高自己的分析判断能力。

二、不确定度评定的意义

如上所述,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,测量结果仍不可能是绝对准确的,它必然有不确定成分。实际上,这种不确定的程度是可以利用一种科学的、合理的、公认的方法来表征的,这就是“不确定度”的评定。在测量方法正确的情况下,不确定度愈小,表示测量结果愈可靠。反之,不确定度愈大,测量的质量愈低,它的可靠性愈差,使用价值就愈低。

对不确定度必须进行正确评价。评价得过高,在实验中会怀疑结果的正确性而不能果断地作出判断,在生产中会因测量结果不能满足要求而需再投资,造成浪费;评价得过低,在实验中可能得出错误的结论,产品质量不能保证,造成危害。

三、关于不确定度的一些基本概念和分类

不确定度的评定十分重要。以往各国对不确定度的表示和评定有不同的看法和规定,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》对实验的测量不确定度有着十分严格的论述。作为普通物理实验教学,只要求学生下对不确定度的下述基本概念有初步的认识和了解。

不确定度是表征测量结果具有分散性的一个参数。它是被测量的真值在某个量值范围内的一个评定。所谓“标准不确定度”是指以“标准偏差”表示的测量不确定度估计值,简称不确定度,常记为 u 。

标准不确定度一般可分为以下三类。

1) A类评定不确定度 在同一条件下多次测量,即由一系列观测结果的统计分析来评定的不确定度,简称 A类不确定度,常记为 u_A 。

2) B类评定不确定度 由非统计分析评定的不确定度,简称 B类不确定度,常记为 u_B 。

3) 合成标准不确定度 由测量值的 A类与 B类不确定度按一定规则算出的测量结果的标准不确定度,简称合成不确定度。

以下分别讨论如何进行不确定度的评定、合成、传递和表示。

四、标准不确定度的评定

1. A类不确定度 u_A

在相同的条件下,对某物理量 x 作 n 次独立的测量,得到 x 值的测量列为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 于是平均值

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

平均值即为测量结果的最佳值。它的不确定度为

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

式中, t 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 $\bar{x} \pm u_A(x)$ 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,一般就取 $t = 1$ 。

2. B类不确定度 u_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 $u_{B1}(x)$ 和仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 两部分组成。

测量不确定度 $u_{B1}(x)$ 是由估读引起的,通常取仪器分度值 d 的 $\frac{1}{10}$ 或 $\frac{1}{5}$, 有时也取 $\frac{1}{2}$, 视具

体情况而定;特殊情况下,可取 $u_{B1} = d$,甚至更大。例如,用分度值为 1 mm 的米尺测量物体长度时,在较好地消除视差的情况下,测量不确定度可取仪器分度值的 $\frac{1}{10}$,即 $u_{B1} = \frac{1}{10} \times 1 \text{ mm}$;但在示波器上读电压值时,如果荧光线条较宽且可能有微小抖动,则测量不确定度可取仪器分度值的 $\frac{1}{2}$,若分度值为 0.2 V,那么测量不确定度 $u_{B1}(x) = \frac{1}{2} \times 0.2 \text{ V} = 0.1 \text{ V}$ 。又如,用肉眼观察远处物体成像的方法粗测透镜的焦距,虽然所用钢尺的分度值只有 1 mm,但此时测量不确定度 $u_{B1}(x)$ 可取数毫米,甚至更大。

仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 是由仪器本身的特性决定的,它的值为

$$u_{B2}(x) = \frac{a}{c} \quad (1-1-3)$$

其中, a 是仪器说明书上标明的“最大误差”或“不确定度限值”; c 是一个与仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 的概率分布特性有关的常数,称为“置信因子”。仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 的概率分布通常有正态分布、均匀分布、三角形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),却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,即 $u_{B2}(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$ 。

有些仪器说明书没有直接给出不确定度限值,但给出了仪器的准确度等级,此时不确定度限值 a 需经计算才能得到。如指针式电表的不确定度限值等于其满量程值乘以等级。例如,满量程为 10 V 的指针式电压表的等级为 1 级,则不确定度限值 $a = 10 \text{ V} \times 1\% = 0.1 \text{ V}$ 。又如电阻箱的不确定度限值等于示值乘以等级再加上零值电阻。由于电阻箱各挡等级不同,因此在计算时应分别进行。例如,常用的 Zx21 型电阻箱的示值为 360.5 Ω ,零值电阻为 0.020 Ω ,则不确定度限值 $a = (300 \times 0.1\% + 60 \times 0.2\% + 0 \times 0.5\% + 0.5 \times 5\% + 0.02) \Omega = 0.47 \Omega$ 。

五、标准不确定度的合成与传递

由正态分布、均匀分布和三角形分布所求得的标准不确定度可以按以下规则进行合成与传递。

1. 合成

①在相同条件下,对 x 进行多次测量时,待测量 x 的标准不确定度 $u(x)$ 由 A 类不确定度 $u_A(x)$ 和仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 合成而得,即

$$u(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_{B2}^2(x)} \quad (1-1-4)$$

式中, $u_{B2}(x)$ 的值由式 (1-1-3) 根据相应的概率分布进行估算。

②对待测量 x 进行单次测量时,待测量 x 的标准不确定度 $u(x)$ 由测量不确定度 $u_{B1}(x)$ 和仪器不确定度 $u_{B2}(x)$ 合成而得,即

$$u(x) = \sqrt{u_{B1}^2(x) + u_{B2}^2(x)} \quad (1-1-5)$$

对于单次测量,有时会因待测量不同,不确定度的计算也有所不同。例如,用温度计测量温度时,温度的不确定度合成公式为上式;而在长度测量中,长度值是两个位置读数 x_1 和 x_2 之差,其不确定度合成公式为 $u(x) = \sqrt{u_{B1}^2(x_1) + u_{B1}^2(x_2) + u_{B2}^2(x)}$ 。这是因为 x_1 和 x_2 在读

数时都有测量不确定度,因此在计算合成不确定度时都要计入。

2. 传递

在间接测量时,待测量(即复合量)是由直接测量的量通过函数计算得到的。若 $y = f(x_1, x_2, x, \dots, x_n)$, 且各 x_i 相互独立,则测量结果 y 的标准不确定度 $u(y)$ 的传递公式为

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (1-1-6)$$

由上式可以得到一些常用的不确定度传递公式如下。

对 $y = x_1 \pm x_2$, 不确定度

$$u^2(y) = u^2(x_1) + u^2(x_2) \quad (1-1-7)$$

对 $y = x_1 \cdot x_2$ 或 $y = x_1 / x_2$, 不确定度

$$\left[\frac{u(y)}{y} \right]^2 = \left[\frac{u(x_1)}{x_1} \right]^2 + \left[\frac{u(x_2)}{x_2} \right]^2 \quad (1-1-8)$$

对 $y = x^n$, 不确定度

$$\left[\frac{u(y)}{y} \right]^2 = \left[n \cdot \frac{u(x_1)}{x_1} \right]^2 \quad (1-1-9)$$

六、不确定度的表示

由于不确定度 $u(x)$ 表示的是待测量 x 的真值在一定的置信概率下可能存在的范围,因而测量结果常表示为 $x \pm u(x)$ 。例如,所测长度为 $(1.05 \pm 0.02) \text{ m}$ 就是不确定度的一般表示法。

有时,以不确定度与待测量的百分比来表示,这样更能看出不确定度的相对大小。这是把测量结果的不确定度表示为 $\frac{u(x)}{x} \times 100\%$ 。例如,所测长度为 1.05 m , 误差为 0.02 , 相对不确定度就为 2% 。这就是不确定度的百分比表示法。

除了以上两种常用的不确定度表示法外,还有一种更为简略的表示法,叫做不确定度的有效数字表示法。所谓有效数字,是指一个数值中从第一个非 0 数字算起的所有数字。例如, $x = 0.0035$ 中的 3 是第一个非 0 数字,因此 x 有两位有效数字 3 和 5, 小数点前后的三个 0 都是表示数量级的,不是有效数字。又如 $x = 3.500$ 的四位有效数字 3、5、0、0 都是有效数字,其中的两个 0 虽然对该数的大小并无意义,但它却表示这个数的准确程度可达小数点后的第三位,即它的值约在 3.499 和 3.501 之间。它与 $x = 3.5$ 显然不同。后者表示小数点后的第一位数(即 5)就是可疑的、不确定的。一般测量最后结果的不确定度只取一位有效数字,而测量结果的末位有效数字应与不确定度的有效数字对齐,即测量结果的末位有效数字是不确定的(特殊情况下,不确定度的有效数字可取两位,即测量值的末两位有效数字都是不确定的)。这样,根据测量值的不确定度,可以决定测量值的有效数字位数。

在计算数据时,当有效数字位数确定后,须对数字进行修约(截取)。修约的规则一般采用“四舍六入五凑偶”。“五凑偶”的意思是遇到被舍弃数字恰为“50”或只有“5”一位数字时,则“5”有时入,有时不入,应使有效数字末位保持为偶数。如对 3.14 159、10.751、573.5、7 465 截取到 3 位,结果是 3.14、10.8、574、746 $\times 10$ 。这样可以使舍与入的机会均等,从而避免在处理较多数据时因入比舍的多而带来的问题。例如,经计算所得的长度值为 $x = 3.54825 \text{ m}$, 若不

确定度为 $0.000\ 3\ \text{m}$, 则应取测量值的结果为 $x = 3.548\ 2\ \text{m}$; 若不确定度为 $0.002\ \text{m}$, 则应取测量值的结果为 $x = 3.548\ \text{m}$; 若不确定度为 $0.05\ \text{m}$, 则应取测量值的结果为 $x = 3.55\ \text{m}$; 若不确定度为 $0.1\ \text{m}$, 则应取测量值的结果为 $x = 3.5\ \text{m}$ (如以毫米为单位, 则应写成 $3.5 \times 10^3\ \text{mm}$, 绝不可写成 $3\ 500\ \text{mm}$)。这样, 从测量值的有效数字就可大约知道它的不确定度, 这就是不确定度的有效数字表示法。显然, 这只是一简略的表示法, 在严格的定量实验中, 应采用不确定度的一般表示法或百分比表示法。

虽然测量结果的不确定度一般只取一位有效数字, 但在运算过程中, 不确定度一般要取两位或更多位, 中间过程的计算值的有效数字也应适当多取一些, 以免过早舍入, 造成不合理的结果。

有效数字的运算有一定规则。最简单和常用的规则是: ①当两个数相加减时, 有效数字的位数应对齐; ②当两个数相乘除时, 有效数字的位数应与有效数字少的一致。例如, $x = 1.832\ \text{m}$ (共有 4 位有效数字, 末位在小数点后第 3 位), $y = 1.69\ \text{m}$ (共有 3 位有效数字, 末位在小数点后第 2 位), 则 $x + y = 3.52\ \text{m}$ (末位取小数点后第 2 位); $x - y = 0.14\ \text{m}$ (末位取小数点后第 2 位); $x \cdot y = 3.10\ \text{m}^2$ (共取 3 位有效数字); $x/y = 1.08$ (共取 3 位有效数字)。

七、实例

用电子天平测得一个圆柱体的质量 $m = 80.36\ \text{g}$, 电子天平的最小指示值为 $0.01\ \text{g}$, 不确定度限值为 $0.02\ \text{g}$; 用钢尺测量该圆柱体的高度 $H = H_2 - H_1$, 其中 $H_1 = 4.00\ \text{cm}$, $H_2 = 19.32\ \text{cm}$, 钢尺的分度值为 $0.1\ \text{cm}$, 估计 $1/5$ 分度, 不确定度限值为 $0.01\ \text{cm}$; 用游标卡尺测量该圆柱体的直径 D (数据如下表所示), 游标卡尺的分度值为 $0.002\ \text{cm}$, 不确定度限值为 $0.002\ \text{cm}$ 。

$D(\text{cm})$	2.014	2.020	2.016	2.020	2.018
	2.018	2.020	2.022	2.016	2.020

试根据上述数据, 计算该圆柱体的密度及其不确定度。

解 圆柱体的质量 $m = 80.36\ \text{g}$

$$u(m) = \sqrt{(u_{\text{BI}}(m))^2 + (u_{\text{BZ}}(m))^2} = \sqrt{(0.01)^2 + (0.02/\sqrt{3})^2} \\ = 0.015\ \text{g}$$

圆柱体的高 $H = H_2 - H_1 = (19.32 - 4.00)\ \text{cm} = 15.32\ \text{cm}$

$$u(H) = \sqrt{2 \cdot (u_{\text{BI}}(H))^2 + (u_{\text{BZ}}(H))^2} \\ = \sqrt{2 \cdot (0.02)^2 + (0.01/\sqrt{3})^2}\ \text{cm} = 0.029\ \text{cm}$$

圆柱体的直径的平均值 $\bar{D} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} D_i = 2.018\ 4\ \text{cm}$

$$u_A(\bar{D}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (D_i - \bar{D})^2 / [10 \times (10 - 1)]} = 0.00\ 078\ \text{cm}$$

$$u(\bar{D}) = \sqrt{(u_A(\bar{D}))^2 + (u_{\text{BZ}}(\bar{D}))^2} \\ = \sqrt{(0.000\ 78)^2 + (0.002/\sqrt{3})^2}\ \text{cm} = 0.001\ 4\ \text{cm}$$

根据上述数据计算材料的密度

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi D^2 H} = \frac{4 \times 80.36}{3.1416 \times (2.0184)^2 \times 15.32} \text{ g/cm}^3 = 1.639 \text{ g/cm}^3$$

$$\frac{u(\rho)}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{u(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{u(H)}{H}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{0.015}{80.36}\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{0.0014}{2.0184}\right)^2 + \left(\frac{0.029}{15.32}\right)^2} = 0.24\%$$

$$u(\rho) = 0.24\% \times 1.639 = 0.004 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho \pm u(\rho) = (1.639 \pm 0.004) \text{ g/cm}^3 = (1.639 \pm 0.004) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

第二节 实验数据处理的基本方法

一、列表法

列表法就是将一组有关的实验数据和计算过程中的数值依一定的形式和顺序列成表格。优点是结构紧凑,简单明了,便于比较、分析和查找,同时也易于及时发现问题和有助于寻找各物理量之间的相互关系(变化规律)。因此列表法是最基本、最常用的方法。制表时一般应注意如下事项。

①制表前,应先明确实验上要测的物理量。明确哪些是直接读出的,哪些是通过计算得出的;哪些量先测,哪些量后测;哪些量只要测一次,哪些量要多次测量求平均值(多次测量时,一般应在 10 次以上,但因课时有限,可取 5 次)。

②表格的设计要利于记录、运算和检查。制表时,应合理安排各个待测量在表格中的位置。一般可先列直接读数量,再列计算得出量;先列先测量,后列后测量;让自变量与因变量在表中一一对应。如果预先可以确定自变量的变化范围和取值,则可按自变量的值由小到大或由大到小在表中预先写好。

③表中涉及的物理量的符号、单位均要交代清楚。如果整个表中单位都是一样的,可将单位注明在表的上方。如单位不统一时,在表格中常用物理量与单位的比值表示。如表 1-2-1 的第一列所示,其中 D 表示物理量,单位是 cm,依此类推。注意,物理量的符号应用斜体书写,单位的符号则用正体书写。这是国家标准中规定的(在用计算机打印时,更应严格遵守此规定)。

表 1-2-1 测量一个圆柱体样品的密度

测量次数	1	2	3	4	5	平均值	u_A
直径 D (cm)							
长度右端 h_1 (cm)							
长度左端 h_2 (cm)							
长度 $h = h_1 - h_2$							

④表中的直接测量量和最后结果应能正确反映测量误差(有效数字填写正确),中间过程

的计算值可以多保留一位。

⑤为了清楚说明表的意义,必要时还应加上表名。

二、作图法

在物理实验中,用作图法可以研究物理量之间的变化规律,可以求得物理量的数值,发现系统误差,作修正曲线或校准曲线或方便地比较不同的物理特性。其优点是直观、简便、有取平均的效果,可以发现某些测量错误,可以把某些复杂的函数线性化。作图法的另一优点是推知未测量点的情况,甚至可以对测量范围以外的变化趋势作出推测。通过图形还可以方便地得到许多有用的参数(最大值,最小值,极值,直线的斜率和截距,弧形的曲率等)。由于图纸的局限及作连线时有相当大的主观任意性,所以作图法仅仅是一种粗略的数据处理方法。

作图法(图 1-2-1)一般应遵守如下规则:

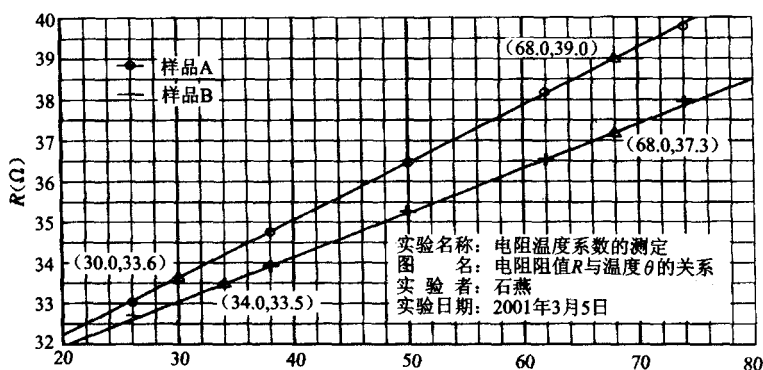


图 1-2-1 例图

①作图一定要用坐标纸。要根据情况选用直角坐标纸、双对数坐标纸、单对数坐标纸、极坐标纸或其他坐标纸等。图纸的大小应能准确反映物理量的有效数字及测量结果。原则上,测量数据中的可靠数字在图中亦是可靠的,数据中有误差的一位在图中也是可以估计的。作图区域应占图纸的一半以上。

②要适当选取 x 轴与 y 轴的比例和坐标的起点,使图形比较对称地充满整个坐标纸。坐标轴的起点不一定取零值,即不一定是坐标原点。取自变量为横坐标(向右增大),取因变量为纵坐标(向上增大)。画出纵、横坐标轴及坐标轴的方向,并与图纸上印的线条密切重合,但坐标轴不要取图纸所印表格的边线。

③根据自变量(及因变量)的最低值与最高值,选取合适的作图比例,标明其所代表的物理量(或符号)并注明单位。在轴上每隔一定的等间距标明该物理量的数值。轴上一般按整数间距标数,而不标数据点的坐标位置。应取图纸上的一格所表示的原数据的量值变化(1、2、5 等数或它们的十进倍率)来标记(只写整数)。

④每隔相同距离,沿轴画一垂直于轴的短线(称为标度线),并在其附近注以标度值。标度值的位数不必取实验数据中的全部有效数字位数,例如 2.50 只标 2.5 即可(一般在各坐标轴上可标记 5~10 个标度值)。

⑤对于每一坐标轴要标明物理量的名称及单位符号(标注的方法与表格相同)。

⑥数据点要用端正的“ $\oplus$ ”或“ $\odot$ ”等符号表示。数据点应在符号的中心,符号的大小应相