



普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

主 编 张晓宏 阎占元

副主编 黄明强 蒙高庆 韩颖慧



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

主 编 张晓宏 阎占元
副主编 黄明强 蒙高庆 韩颖慧

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是以教育部原高等学校物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》为指导,结合华北电力大学多年的实验课程教学改革经验,在校内讲义基础之上编写的。

全书共6章,42个实验。第一章为预备性实验,包括测量误差分析与数据处理、常用物理仪器的使用等内容。第二章至第六章分别是力学、热学、光学、电磁学和近代物理实验,内容涵盖了基本物理实验知识、物理实验方法和数据处理方法,反映了物理实验在当代科技中的应用,并包含了一定比例的综合性和设计性实验。

本书可作为高等院校理工科专业本科生物理实验教材,也可供相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/张晓宏,阎占元主编. —北京:科学出版社,2014.1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-03-039410-4

I. ①大… II. ①张… ②阎… 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310968号

责任编辑:昌盛 王刚 / 责任校对:宋玲玲

责任印制:阎磊 / 封面设计:迷底书装

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>

安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年1月第一次印刷 印张:17 3/4

字数:421 000

定价:36.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是以教育部原高等学校物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》为指导,在华北电力大学内部讲义第九版基础之上编写,是学校几十年物理实验课程建设、实验教学经验的结晶。

本书共6章,收录42个实验,都是经过反复取舍才最终确定,满足《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》的内容。第一章为预备性实验,目标是让学生掌握测量误差理论,熟悉常用仪器的结构、原理和使用方法,为后阶段的实验奠定基础。第二章至第六章分别是力学、热学、光学、电磁学和近代物理实验,内容涵盖了基本物理实验知识、物理实验方法和数据处理方法,反映了物理实验在当代科技中的应用,并包含了一定比例的综合性 and 设计性实验,有利于培养学生独立实验、分析与研究、创新的能力。

本书在编写过程中注重将学校多年的实验教学经验融入到各个实验中,主要体现在:对学生较难理解的实验原理,力求从学生的知识结构出发,深入浅出地进行阐述;每个实验都编写了预习题,目的是引导学生实验前预习,熟悉实验内容和实验原理,并写出预习报告;每个实验均有实验提示,内容包括实验注意事项、操作技巧、讲解经验、教学建议等,有助于教学效果的提高;大多数实验都提供了相关背景介绍、实验知识扩展、复杂公式推导和相关研究进展等内容,方便学生深入了解相关知识,深层次地思考和研究。

参加本书编写人员的分工如下:张晓宏编写实验五、十一、十三、三十、三十四、三十七、四十;阎占元编写实验一、二、二十一、二十三、三十三、三十五、三十八、三十九、四十二;黄明强编写实验三、六、十二、十六、十八、二十二、二十五、二十六、二十八、四十一;蒙高庆编写实验四、七、八、九、十、十四、十五、十七、十九、二十、三十一;韩颖慧编写实验二十四、二十七、二十九、三十二、三十六。

本书是在华北电力大学使用多年的校内讲义基础之上编写而成,该讲义已经再版八次,先后参与各版讲义修订的主要有华北电力大学物理学科教师赵玉屏、贾彦枝、曹春梅、白占武、张贵银、关荣华、陈素敏、康文秀、王海英、万景瑜、徐东海、王小宁、马金英、王志刚、赵顺龙、于国梁、王修武、王永杰、赵占龙。此外,还有许多教师对本书的编写提出建议或提供帮助,这里就不再一一列出。对他(她)们的辛勤工作,在此表示衷心的感谢!书中不妥之处在所难免,敬请使用本书的师生多提宝贵意见,以便再版时进行修订。

编 者

2013年9月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 预备性实验	5
实验一 测量误差与数据处理	5
实验二 力学基本测量	19
实验三 电学基本仪器与测量	26
实验四 光学基本测量	41
实验五 示波器的原理及使用	49
实验六 电阻的测量	57
第二章 力学实验	64
实验七 气垫导轨上的力学实验	64
实验八 刚体的转动惯量	70
实验九 用三线摆和扭摆测定物体转动惯量	75
实验十 用玻尔共振研究受迫振动	79
实验十一 用拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量	84
实验十二 动态法测杨氏模量	89
实验十三 声速的测量	94
实验十四 液体表面张力系数的测量	100
实验十五 双光栅微弱振动测量	103
第三章 热学实验	110
实验十六 铜电阻温度系数的测定	110
实验十七 金属导热系数测量	115
实验十八 准稳态法测量比热和导热系数	118
实验十九 空气热机实验	130
实验二十 压强与沸点关系的测定	137
实验二十一 用落针法研究液体黏滞系数与温度的关系	141
实验二十二 半导体制冷实验	144
第四章 光学实验	151
实验二十三 等厚干涉	151
实验二十四 迈克耳孙干涉仪	158
实验二十五 分光计的调整 and 光栅衍射	167
实验二十六 三棱镜折射率的测定	175
实验二十七 全息照相	179

第五章 电磁学实验	187
实验二十八 万用表的组装与校准.....	187
实验二十九 电势差计的原理和使用.....	195
实验三十 灵敏电流计的研究.....	203
实验三十一 静电场描绘.....	210
实验三十二 霍尔效应及磁场的测定.....	214
实验三十三 电磁感应法测交变磁场.....	223
实验三十四 非均匀磁场的测量.....	229
实验三十五 太阳能电池特性测量.....	234
第六章 近代物理实验	240
实验三十六 用光电效应测量普朗克常量.....	240
实验三十七 密立根油滴实验.....	245
实验三十八 弗兰克-赫兹实验	251
实验三十九 音频信号光纤传输技术实验.....	258
实验四十 非线性电路与混沌.....	263
实验四十一 居里温度的测量.....	267
实验四十二 pn 结的物理特性	271
附录	276

绪 论

一、大学物理实验课的地位、作用和任务

物理学是一门实验科学,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。

在物理学中,每个概念的确立、原理和定律的发现都有坚实的实验基础.理论物理学用逻辑推理的方法预言了很多新的规律和定理,但是即使最严谨的理论也必须通过实验的检验才能得到证实和公认.物理学史上的许多关键问题最终都是通过实验得出结论:赫兹的电磁波实验证实了麦克斯韦的电磁场理论;吴健雄进行 β 衰变中产生的电子角分布实验,证实了弱作用中宇称不守恒;戴维孙和革末用电子束打在镍晶体上得到衍射环纹,使得德布罗意的物质波假设得到证实.可见物理实验在物理学概念的提出、理论规律的确立及被公认的过程中占有重要地位并且起着关键作用。

物理学的实验思想、实验方法以及实验手段渗透到自然科学的各个领域,成为相关学科的实验基础.例如,电子显微镜、核磁共振、X射线衍射、扫描隧道显微镜等物理仪器和实验方法的发明和应用,为生命科学的基础研究提供了全新的方法和工具,由此确定了DNA的双螺旋结构,揭示了遗传密码的本质;核物理学的实验技术、设备和方法,在能源、医疗、军事等多个领域有着广泛的应用,与我们的生活息息相关。

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,是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端.物理实验内容覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、手段,能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力、提高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。

本课程的具体任务是:

(1) 培养与提高学生科学实验基本素质,确立正确的科学思想和科学方法.

通过物理实验课的教学,使学生掌握不确定度分析、数据处理的理论和方法,学会常用仪器的调整和使用,了解常用的实验方法,能够对常用物理量进行一般测量,具有初步的实验设计能力。

(2) 培养与提高学生创新思维、创新意识、创新能力.

通过物理实验引导学生深入观察实验现象,建立合理的模型,定量研究物理规律;运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断,逐步学会提出问题、分析问题和解决问题的方法,激发学生创造性思维;能够完成符合规范要求的设计性内容的实验,进行简单的具有研究性或创意性内容的实验。

(3) 培养与提高学生的科学素养.

要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风、严肃认真的工作态度、主动研究

的探索精神,遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德.

二、物理实验课的主要教学环节

大学物理实验教学主要有三个重要环节.

1. 实验预习

实验预习要求学生实验的原理和内容有清楚的认识,为有条不紊地完成实验打下基础.课前要仔细阅读实验教材和相关材料,列出实验内容,并从中整理出实验所涉及的主要物理概念、定律、公式等,列出自己对本次实验的疑问,解答教材中的预习题,完成预习报告.有些实验还要求课前自己拟定实验方案、设计电路或光路图、数据记录表格等.

2. 实验操作

进入实验室后自觉遵守实验守则、遵守仪器操作规程、细心观察实验现象、认真记录实验数据、分析解决实验中遇到的问题.

(1) 首先要清楚仪器操作注意事项,在不熟悉实验仪器之前不要随意打开电源、转动旋钮、连接线路等.

(2) 仪器在使用过程中难免会发生故障,应在教师指导下学会分析排除故障.

(3) 实验数据读取和记录要认真、清楚、真实.读取数据时应读出仪器所能提供的所有有效位数,记录数据要实事求是,不能编造数据.

(4) 记录数据要用钢笔或圆珠笔,不能用铅笔.数据记录不能涂改,当数据记录出现错误需要更正时,应用斜线划掉错误数据,在其旁边写上正确的数据.

(5) 原始实验数据要交教师审阅.

(6) 实验结束,要整理好实验仪器后,方可离开实验室.

3. 实验报告

实验完毕后要及时写出合格的实验报告.实验报告是学生实验成果的书面反映,是学生实验技能、写作能力、科学素养的综合展示.实验报告应力求文字简练、通顺,数据齐全,图表正确,一份完整的实验报告一般应包括以下内容:

(1) 实验名称、实验目的:在教材中找到相关内容.

(2) 实验仪器:大多数实验要写出仪器的名称、型号、参数.

(3) 实验原理:简要阐述基本原理、写出主要公式、画出光路图、电路图 etc.

(4) 实验内容:列出实验内容,写出获取实验数据的主要过程.

(5) 测量结果和数据处理:设计表格整理原始实验数据,写出数据处理的完整过程,应先写出公式,然后代入数据,最后计算出结果.注意计算过程中和最终结果有效位数的保留.

(6) 实验结果分析:结合实验条件、过程,对实验结果进行具体分析和讨论.

(7) 作业题解答:作业题可以起到对实验相关知识的巩固和拓展作用,是对知识掌握

的检验,有时需要查阅参考资料才能完成.

三、常用实验方法介绍

随着科学技术的飞速发展,人类对客观世界的认识越来越深入,实验方法也越来越丰富,下面介绍大学物理实验中几种常用的实验方法.

1. 比较法

通过将待测的未知量与已知的标准量进行比较而达到测量目的的方法称为比较法.比较法是基本、普遍的物理测量方法.

按照比较过程中是否进行了转换,比较法可分为“直接比较法”和“间接比较法”.直接比较法就是将待测量与量具上属于同类物理量的标准量进行直接比较,测出其大小.例如,用米尺测量长度,用秒表测量时间.间接测量法是将待测物理量转变为另一种与其有函数关系的能与已知标准量直接比较的物理量,再进行比较测量的方法.例如,用水银的热膨胀测量温度、用弹簧的形变测力等均为间接比较测量法.

为了进行比较,常用以下测量方法:

(1) 直读法.米尺测量长度、电流表测电流强度、秒表测量时间等,都是直接读出被测值,称为直读法.

(2) 均衡法、补偿法或示零法.把标准值 S 选择或调节到与待测物理量 X 值相等,用于抵消(或补偿)待测物理量的作用,使系统处于平衡(或补偿)状态.例如,天平称量质量、电桥测电阻、电位差计测量电压等.

(3) 交换法和替代法.为了消除不等臂天平的系统误差,可以用交换法测量:首先在天平的左盘放置被测物体,右盘放砝码,称量一次,然后在右盘放置被测物体,左盘放砝码,再称量一次,取两次称量结果的平均值作为被测物体的质量.测量电阻时,把被测量电阻接入电路中,测量出电阻两端的电压和电流,在保持电路电压不变的情况下,接入变阻箱,调节电阻箱的阻值,使电路中电流与先前的电流值相同,则变阻箱的阻值就是未知电阻的阻值.这种测量方法称为替代法.

2. 放大法

待测物理量十分微小的情况下,可以将其放大后再进行测量,根据待测物理量的不同,放大的原理和方法也不同.

(1) 累积放大法.通过测量十条干涉条纹的间距,计算出相邻干涉条纹的间距,就是利用了累积放大法.

(2) 机械放大法.0.02mm 游标卡尺的原理就是用游标尺将主尺最小刻度均匀分成 50 等份,相当于将毫米间隔机械放大了 50 倍.

(3) 电学放大法.电信号的放大包括电压、电流、电功率等信号的放大,随着电子技术的发展,电信号的放大很容易实现.

(4) 光学放大法.显微镜、望远镜等都是将视角放大,使我们能观察到细节;光杠杆可以将微小位移放大.

3. 转换法

当物理量不容易直接测量时,可以转换成测量与该物理量有函数关系的可以直接测量的量,然后计算求出待测物理量.例如,卡文迪许利用扭秤测定万有引力常数实验中就是通过测量石英丝发生扭转的角度来测量万有引力的大小.常见的转化有光电转换、电磁转换、压电转换、机械形变和电信号之间的转换等.

4. 模拟法

不能对某些物理量进行直接实验和测量,人为地建立一个等效模型,用对模型的测量代替对原型的测量.例如,对静电场直接测量很困难,可用测量稳恒电流场来模拟静电场的电场线分布.

5. 计算机模拟方法

随着计算技术的飞速发展,用计算机对物理过程进行仿真模拟已经成为普遍的方法,并得到了广泛的应用.目前已经出现了大学物理实验网上实验系统,利用计算机技术模拟出各种仪器仪表,学生可以在网上进行实验操作,观察到各种实验现象,得到相应的测量数据,作为辅助教学使用.在高能物理实验中,实验费用是惊人的,利用计算机模拟方法可以通过模拟实验得到相应的数据,大大促进了研究的进展.电厂的运行仿真系统,实际上就是应用计算机模拟方法进行的模拟实验.

第一章 预备性实验

实验一 测量误差与数据处理

人类在认识世界和改造世界过程中,经常要对各种自然现象进行研究和测量.由于测量装置、测量人员、测量方法、测量环境、被测对象等因素的影响,测量的结果与真实值之间存在误差,误差具有普遍性和必然性.在国际和国内的政治、经济、科学研究交流过程中,要使测量结果得到公认,需要科学的误差分析和数据处理理论.

一、测量的定义与分类

确定被测对象量值的全部操作叫做测量.

若按照测量结果的获取方式分类,测量可分为以下两类.

1. 直接测量

直接测量是指被测量的测量结果可以直接由仪器得到,而不需要经过量值的变换和计算.例如,使用天平测量质量、游标卡尺测量长度、温度计测量温度、万用表测量电压电阻等.

2. 间接测量

间接测量是指通过测量与被测量有函数关系的其他量,然后通过函数关系求得被测量量值.例如,通过测量电阻两端的电压和电流求得电阻阻值,通过测量固体的体积和质量求得密度等.科学研究中的测量多数属于间接测量.

另外,按测量条件是否发生改变分类可分为:等权测量和不等权测量;按测量对象在测量过程中所处的状态可分为:静态测量和动态测量.

二、误差的定义、分类和处理方法

1. 误差的定义

误差是测量结果与被测量的真值之间的差,它普遍存在于测量过程中,由于测量仪器不准确、测量人员操作差异、测量方法不完善、测量环境不稳定、被测对象改变等因素的影响,测量的结果与真实值之间存在误差.误差可以用下式表示:

$$dy = y - y_t \quad (1.1)$$

其中, dy 叫绝对误差,通常简称误差; y 是测量结果; y_t 是被测量的真值.

物理实验中,真值是一个理想概念,一般无从得知,只有在少数特殊情况下,我们才能够知道被测量的真值.例如,三角形内角和为 180° 就是一种理论真值.

为了定量描述误差,人们只能用准确度很高的约定真值,通常将被测量的多次测量结

果的平均值或国际计量组织公布的常数数值作为约定真值。

有些问题往往需要用相对误差表示。例如,用同一仪器测量 10m 的长度时误差为 1mm,而测量 100m 的长度时误差也是 1mm。显然,绝对误差难以评价测量结果的可靠程度,因此需要引入相对误差的概念。相对误差是绝对误差与被测量的真值(约定真值)之间的比值,即

$$r = \frac{\Delta y}{y_t} \times 100\% \quad (1.2)$$

相对误差也可能为正值或负值,没有单位,通常用百分数来表示。

2. 误差的分类和处理方法

误差可分为系统误差和随机误差。

1) 系统误差

在同一条件下,多次测量同一量时,绝对值和符号保持不变,或在条件改变时,按一定规律变化的误差称为系统误差。例如,标准量值的不准确性、仪器刻度的不准确而引起的误差、记录动态数据时习惯性的滞后等。

按照对误差掌握的程度来划分,系统误差分为以下两类。

(1) 已定系统误差。

指符号和绝对值已经确定的误差。包括仪器本身的缺陷所引起的误差,如仪器零点不准等;由于实验理论和方法不够完善所引起的误差,如伏安法测电阻时,内接法和外接法都会引起已知的系统误差。

已定系统误差可以完全消除,处理方法为

$$\text{测量结果} = \text{测量值} - \text{已定系统误差}$$

(2) 未定系统误差。

指符号或绝对值未经确定的系统误差。例如,尺子的刻度本身就存在误差,砝码的质量也存在未知的误差等。

由于未定系统误差不能确定,处理未定系统误差的方法通常是给出误差范围。

2) 随机误差

在同一测量条件下,多次测量同一量时,绝对值和符号以不可预知方式变化的误差称为随机误差,如仪器仪表中传动部件的间隙和摩擦、电压的漂移起伏、人员读数及操作的不稳定等。

多次测量时,随机误差分布满足一定的统计分布规律,呈对称分布,相互具有抵偿性,因此处理随机误差的方法是对多次测量结果 y_i 取算术平均值,即

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (1.3)$$

算术平均值可以抵消掉大部分随机误差,因此它可以作为最佳估计值代替真值。

增加测量次数 n , 计算平均值时抵偿效果好,但并非测量次数越多越好。测量时间、环境变化可能会引入新的误差,通常 n 取 5~10 次。

测量值 y_i 的分散性可以用标准偏差来表征,即

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (1.4)$$

S 值直接体现了随机误差的分布特征. S 值大表示测得值分散,随机误差分布范围宽,测量精密度低; S 值小表示测得值密集,随机误差分布范围窄,测量精密度高. 当测量次数 n 很大时,标准偏差 S 记作 σ ,则

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}} \quad (1.5)$$

在物理实验中,多次测量得到的数据一般可近似看成正态分布,其特征可以用正态分布曲线表示出来,如图 1.1 所示.

定义 $p = \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx$, 表示测量结果出现在 $[x_1, x_2]$ 区间的概率,称为置信概率. 符合正态分布的测量中,某次测量值与平均值之差落在 $[\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma]$ 之间的概率为 68.3%, 落在 $[\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} + 2\sigma]$ 之间的概率为 95.55%, 落在 $[\bar{x} - 3\sigma, \bar{x} + 3\sigma]$ 之间的概率为 99.73%.

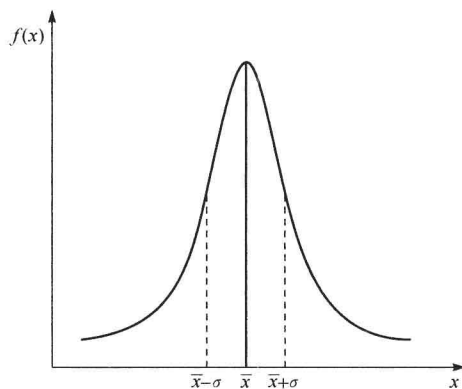


图 1.1 随机误差的正态分布

三、不确定度的概念、测量结果的不确定度估计

由于测量误差的存在,被测量的真值难以确定,测量结果具有不确定性. 如何以最科学的方法评价测量结果的质量高低,不确定度是一项重要的指标.

1. 不确定度的概念

不确定度是对被测量的真值所处的量值范围的评价量,表示被测量值的分散性,用 Δ 来表示. 一个完整的测量结果包含被测量值的估计值与分散性参数两部分,即

$$y = \bar{y} \pm \Delta \quad (\text{单位}) \quad (1.6)$$

在测量不确定度的定义下,测量结果所表示的不是一个确定的值,而是测量值所处的一个区间,误差在 $(-\Delta, +\Delta)$ 之外可能性很小.

不确定度和误差都是评价测量结果质量高低的重要指标. 误差是一个理想概念,一般不能准确知道. 不确定度反映人们对测量结果变化的不肯定,可以定量评定. 误差是不确定度的基础,不确定度是对经典误差理论的补充,是现代误差理论的重要内容.

不确定度评定方法有两类:A 类评定和 B 类评定. 由测量数据的统计分析来评定的称为 A 类评定,评定结果称为 A 类不确定度分量,用 Δ_A 表示,如评价随机误差引起的不确定范围;基于经验或其他信息所认定的概率分布来评定的称为 B 类评定,评定结果称为 B 类不确定度分量,用 Δ_B 表示,如评价未定系统误差引起的不确定范围.

依据我国 1994 年修订的“测量误差及数据处理技术规范”,以及多年来人们对测量不确定度表示的研究,依照我国计量技术规范,在物理实验教学中采用一种简化的具有近似性的不确定度估计方法,下面以直接测量和间接测量为例进行介绍.

2. 直接测量结果不确定度的合成

直接测量结果不确定度的合成在处理实验数据过程中经常用到,是基本的处理实验数据的技术.

(1) 直接测量结果用 $y = \bar{y} \pm \Delta$ 表示, y 处于 $(\bar{y} - \Delta, \bar{y} + \Delta)$ 区间的可能性(置信概率)大于等于 95%.

(2) 测量结果总不确定度 Δ 由 A 类分量 Δ_A 和 B 类分量 Δ_B 合成,合成法则是

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (1.7)$$

(3) Δ_A 由标准偏差 S 乘以因子 $(t/\sqrt{n})$ 来求得

$$\Delta_A = (t/\sqrt{n}) \cdot S \quad (1.8)$$

同一条件下,进行有限次测量,测量数据分布不是正态分布,而是 t 分布. 区间 $(-\Delta_A, +\Delta_A)$ 若要满足置信概率大于等于 95% 的要求,测量次数 n 不同, $(t/\sqrt{n})$ 取值也不同,如表 1.1 表示.

表 1.1 t 分布因子

测量次数 n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	...
$t/\sqrt{n}$	8.98	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72	0.55	0.47	...

注:多数实验中 $5 \leq n \leq 10$ 时,因子 $t/\sqrt{n} \approx 1$,可以近似取 $\Delta_A \approx S$.

(4) Δ_B 主要由仪器误差限值 Δ_{INS} 来确定.

无法用统计方法来评定的误差,不确定度都要用 B 类分量评定. 要基于影响结果的全部信息进行综合评定,如仪器制造说明书、检定证书、手册提供的参考数等. 我们的实验中用仪器标定的误差限值 Δ_{INS} (或最大允差、示值误差) 评定,即 $\Delta_B \approx \Delta_{\text{INS}}$. Δ_{INS} 一般由以下途径得到:

① 仪器说明书给出的误差限值,如 0~25mm 螺旋测微计误差限值为 $\pm 0.004\text{mm}$,常见仪器的误差限值见附录.

② 由仪器的准确度等级 N 确定: $\Delta_{\text{INS}} = N\% \times \text{量程}$,如量程为 5mA,准确度等级为 $N=0.5$ 的电流表,其仪器误差限值为 $\Delta_{\text{INS}} = 0.5\% \times 5\text{mA} = 0.025\text{mA}$.

③ 没有给出误差限值的仪器, Δ_{INS} 取仪器最小分度值的一半.

(5) 相对不确定度 u_r .

为了更直观地评价测量结果的准确度,经常要计算相对不确定度

$$u_r = \frac{\Delta}{\bar{y}} \times 100\% \quad (1.9)$$

一般相对不确定度越小,测量的准确度越高.

(6) 对于单次测量, Δ_A 虽存在,但不能按照公式(1.8)计算出来,因此总不确定度粗略取为 $\Delta \approx \Delta_{\text{INS}}$. 显然,没有考虑 Δ_A ,使总不确定度 Δ 变小了,但是这并不说明测量结果更加准确,相反这是一种更为粗略的不确定度的评定方法.

计算举例:

例 1.1 用 1 级螺旋测微计测量某圆柱直径 6 次, 测量值分别为 8.345mm、8.348mm、8.344mm、8.343mm、8.347mm、8.343mm, 测量前螺旋测微计的零点误差为 -0.003mm, 1 级螺旋测微计的示值误差限值为 $\Delta_{\text{INS}} = 0.004\text{mm}$.

处理圆柱直径测量数据的过程如下:

a. 圆柱直径的算术平均值

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} = \frac{8.345 + 8.348 + 8.344 + 8.343 + 8.347 + 8.343}{6} = 8.345 \text{ (mm)}$$

b. 对已定系统误差修正 $d = \bar{d} - d_0 = 8.345 - (-0.003) = 8.348 \text{ (mm)}$

c. 标准偏差
$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}} = 0.0021 \text{ mm}$$

d. A 类不确定度 $\Delta_A = (t/\sqrt{n}) \cdot S = 1.05 \cdot 0.0021 = 0.0022 \text{ (mm)}$

e. B 类不确定度 $\Delta_B = \Delta_{\text{INS}} = 0.004 \text{ mm}$

f. d 的总不确定度

$$\Delta_d = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{0.0022^2 + 0.004^2} = 0.0046 \text{ (mm)} \text{ (或 } 0.005 \text{ mm)}$$

g. 测量结果 $d = \bar{d} \pm \Delta_d = (8.3480 \pm 0.0046) \text{ mm}$

$$\text{或 } d = \bar{d} \pm \Delta_d = (8.348 \pm 0.005) \text{ mm}$$

h. 相对不确定度 $u_r = \frac{\Delta_d}{d} \times 100\% = \frac{0.0046}{8.3480} \times 100\% = 0.06\%$.

3. 间接测量结果不确定度的合成

间接测量量是由直接测量量按函数关系计算得到的, 因此直接测量量的不确定度就必然要传递给间接测量量.

设间接测量量 y 可写成直接测量量 $x_k (k = 1, 2, 3, \dots)$ 的函数

$$y = f(x_k) \quad (1.10)$$

从 y 的全微分表示可以看出

$$dy = \sum_k \frac{\partial f}{\partial x_k} dx_k \quad (1.11)$$

式中, dy 、 dx_k 可分别看作间接测量量和直接测量量的误差. 在直接测量量 x_k 相互独立的前提下, 间接测量量的标准偏差 S_y 严格地由直接测量量的标准偏差 S_{x_k} 合成而来, 则

$$S_y = \sqrt{\sum_k \left(\frac{\partial f}{\partial x_k} \cdot S_{x_k} \right)^2} \quad (1.12)$$

这就是标准偏差的传递公式.

从上式出发, 人们公认为间接测量量的不确定度 Δ_y 是以标准差形式表示的不确定度, 其合成公式与式(1.12)相同. 因此, 我们得到不确定度的传递公式

$$\Delta_y = \sqrt{\sum_k \left(\frac{\partial f}{\partial x_k} \cdot \Delta_{x_k} \right)^2} \quad (1.13)$$

实验中,大多数函数式 $f(x_k)$ 是复杂的乘除关系,用相对不确定度传递公式较简便,即

$$u_r = \frac{\Delta_y}{y} = \sqrt{\sum_k \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_k} \right)^2 \cdot \Delta_{x_k}^2} \quad (1.14)$$

综上所述,间接测量结果不确定度的计算分为三步:

- (1) 先计算各直接测量量 x_k 的不确定度 Δ_{x_k} ;
- (2) 根据 $y=f(x_k)$ 计算出全微分 $\frac{\partial f}{\partial x_k}$ 或 $\frac{\partial \ln f}{\partial x_k}$;
- (3) 用式(1.13)或式(1.14)计算出 y 的不确定度 Δ_y 或相对不确定度 u_r .

例 1.2 经测量,一个圆环外径 $D_2=(3.600 \pm 0.004)\text{cm}$,内径 $D_1=(2.880 \pm 0.004)\text{cm}$,高度 $h=(2.575 \pm 0.004)\text{cm}$,计算圆环的体积 V 、不确定度 ΔV 和相对不确定度 u_r .

处理圆环体积测量数据的过程如下:

a. 圆环体积为

$$V = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) h = \frac{\pi}{4} (3.600^2 - 2.880^2) \cdot 2.575 = 9.436 \text{ (cm}^3\text{)}$$

b. 圆环体积的对数及其微分

$$\ln V = \ln \frac{\pi}{4} + \ln(D_2^2 - D_1^2) + \ln h$$

$$\frac{\partial \ln V}{\partial D_2} = \frac{2D_2}{D_2^2 - D_1^2}, \quad \frac{\partial \ln V}{\partial D_1} = -\frac{2D_1}{D_2^2 - D_1^2}, \quad \frac{\partial \ln V}{\partial h} = \frac{1}{h}$$

c. 相对不确定度

$$u_r = \frac{\Delta V}{V} = \sqrt{\left(\frac{2D_2}{D_2^2 - D_1^2} \Delta_{D_2} \right)^2 + \left(\frac{2D_1}{D_2^2 - D_1^2} \Delta_{D_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{h} \Delta_h \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{2 \times 3.600 \times 0.004}{3.600^2 - 2.880^2} \right)^2 + \left(\frac{2 \times 2.880 \times 0.004}{3.600^2 - 2.880^2} \right)^2 + \left(\frac{0.004}{2.575} \right)^2}$$

$$= 0.0081 = 0.81\%$$

d. 不确定度 $\Delta V = V \cdot u_r = 9.436 \times 0.0081 \approx 0.076 \text{ (cm}^3\text{)}$

e. 结果表达式 $V = \bar{V} \pm \Delta V = (9.436 \pm 0.076) \text{ cm}^3$

四、有效位数及其运算规则

1. 有效位数

有效位数是指从仪器上直接读出的准确的位数加上一位或两位估读位数之和. 实验数据从非零数字最左一位向右数而得到的位数,就是有效位数. 例如,0.0320 有效位数是 3 位,关于有效位数应注意以下几点:

(1) 有效位数末尾的估读位数可以是一位也可以是两位. 例如,用钢直尺测量长度,如图 1.2 所示,钢尺最小刻度为 1mm,图中可以看出物体一端处于 4.2~4.3cm 约 3/10

的位置,长度读为 4.23 cm,其中 4 和 2 是准确的,最后一位 3 是估读的. 图 1.3 是 5mA 表,0.5 级,100 格分度,每格 0.05mA,可估读到 0.005mA. 图中可以看出指针处于 4.30~4.35mA 约 3/10 的位置,电流表最小刻度为 0.05mA,其 3/10 应为 0.015mA,因此电流表读数应为 4.315mA,其中 4 和 3 是准确的,最后两位 1 和 5 是估读的.

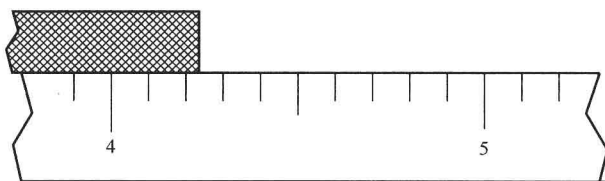


图 1.2 一位估读位数

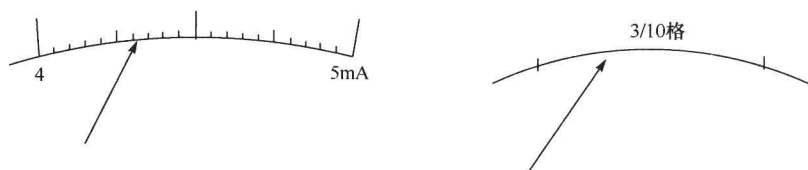


图 1.3 两位估读位数

(2) 单位变换后,有效位数不可改变. 例如,测得某地重力加速度是 $9.82\text{m/s}^2 = 9.82 \times 10^3\text{mm/s}^2$,是 3 位有效位数,不可写作 9820mm/s^2 ,后者是 4 位有效位数.

(3) 对没有小数位,且以若干个零结尾的数值,从非零数字最左一位向右数而得到的位数,再减去仅用来定位的无效零的个数才是有效位数. 例如 35 000,若有两个无效零,则为三位有效位数,应写为 3.50×10^4 ;若有三个无效零,则为两位有效位数,应写为 3.5×10^4 .

2. 修约

修约就是去掉数据中多余的位,也叫做“化整”. 对数据进行修约的基本原则应使最后测量结果的不确定度基本不会增大.

1) 修约间隔

修约间隔是修约后数据末尾的最小差值,是确定修约保留位数的一种方式. 在物理实验中,修约间隔一般取 10 的整数次幂,叫单位修约间隔. 如 0.01、0.1、1、 1×10 、 1×10^2 等. 如指定修约间隔为 0.1,修约值即应在 0.1 的整数倍中选取,相当于将数值修约到一位小数. 有时也可用这些数值的 0.5 倍或 0.2 倍作为修约间隔(见附录),如 0.5 级 5mA 量程的电流表读数的修约间隔就是 0.005mA. 修约间隔的数值一经确定,修约值即应为该数值的整数倍.

2) 修约规则

我国和大多数国家规定了基本一致的修约规则,可以简单的叫做“四舍六入五凑偶”规则,说明如下.

要求将下列数据取 4 位有效位数.