

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主编 龙作友 王丰

DAXUE WULI SHIYAN
DAXUE WULI SHIYAN



04-33
147

大学物理实验

主 编 龙作友 王 丰
编 写 (按姓氏笔画排序)
王 丰 龙作友
仲炽维 杜继昕
徐哲惠

湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/龙作友,王丰主编. —武汉:湖北科学技术出版社,2003.8

ISBN 7-5352-3007-5

I. 大… II. ①龙…②王… 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(2003)第 055357 号

大学物理实验

© 龙作友 王 丰 主编

责任编辑:王连弟 冯友仁

封面设计:喻 杨

出版发行:湖北科学技术出版社

电话:87679468

地 址:武汉市雄楚大街 268 号湖北出版文化城 B 座 12-14 层

邮编:430070

印 刷:安陆市鼎鑫印务有限责任公司

邮编:432600

督 印:刘春尧

787 毫米×1092 毫米

16 开

13.25 印张

300 千字

2003 年 8 月第 1 版

2004 年 8 月第 2 次印刷

印数:6 001-10 500

ISBN 7-5352-3007-5/G·732

定价:17.00 元

本书如有印装质量问题 可找承印厂更换

内 容 简 介

本书依据国家教委颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》和《基础课实验教学示范中心建设标准》的有关要求编写而成,集中反映了武汉理工大学物理实验教学的改革成果和老师们长年积累的教学经验。全书精选了包括力学、热学、电磁学、光学和近代物理方面的实验共 31 个,并按基本训练、基础实验、综合实验与设计性实验三个教学阶段编排。书中介绍了数据处理及不确定度的基本知识,对实验原理及方法的叙述繁简适度,注重对学生能力的培养,利于教学,有所创新。

本书适合作为高等学校理工科各专业物理实验课程的教材或教学参考书,也可以作为其他涉及物理学的广大师生和实验工作者的参考书。

前 言

大学物理实验是理工科大学生必修的一门单独设置的基础课,是培养提高学生科学实验能力和创新精神的重要课程。我们依据我国现行的《高等工业学校工科物理实验教学基本要求》和《基础课实验教学示范中心建设标准》的有关要求,以武汉理工大学多年使用的物理实验教材为基础,充分吸收物理实验教学改革的优秀成果,按照新的教学体系,重新编写了本书。

打好基础、精选内容、利于教学、有所创新是贯穿全书的主导思想。在保证基础的前提下,我们注意加强综合性、设计性实验的训练,突出主动性和创新意识的培养。按照三段式教学体系和循序渐进的原则,我们对实验项目和实验报告及数据处理的要求都分成三个层次和阶段编排:

在基本训练阶段,集中学习物理实验基本工具和仪器的使用,对学生进行实验过程和方法的初步训练,学习书写实验报告。

第二阶段安排了大量的基础实验项目,加强实验方法、实验技能、数据处理和误差分析的训练,让学生独立撰写规范的实验报告。

第三阶段主要安排了综合、近代、设计性实验,进一步加强学生实验能力和创新精神的培养,指导学生设计实验。

本书简明扼要地论述了各实验的基本原理,适当地介绍了主要仪器的原理和使用方法,使学生能尽快独立地进行实验操作。每个实验的预习思考题提示了该实验的要点、难点,帮助学生课前认真思索、积极准备;讨论思考题留给学生实验后完成,有利于加深理解、总结提高。

武汉理工大学物理实验中心全体教师对本书的编写给予了大力支持和帮助。本书融汇了大家多年来认真探索实验教学改革的成果,实际上是一项集体创作的结晶。本书第一章曾由朱鹤年教授审阅,并提出了宝贵的修改意见。部分内容及附表参考了同类教材。在此一并致以深切谢意。

编者水平所限,书中难免疏漏和错误之处,恳望读者不吝赐教。

编者

2003年7月

目 录

绪论	(1)
第一章 测量误差与数据处理基础知识	(4)
第二章 基本训练	(19)
实验一 测刚体的转动惯量	(19)
实验二 补偿法测电阻	(25)
实验三 薄透镜焦距的测定	(30)
实验四 用电位差计测量电动势	(35)
附录 A 力学常用测量工具	(42)
附录 B 电学实验基本知识	(47)
第三章 基础实验	(51)
实验五 用拉伸法测钢丝的杨氏模量	(51)
实验六 测定空气的比热容比	(56)
实验七 液体粘滞系数测量	(59)
实验八 模拟静电场	(63)
实验九 示波器的使用	(69)
实验十 用示波器测铁磁材料的磁滞回线	(78)
实验十一 霍尔效应及其应用	(83)
实验十二 用牛顿环测定透镜的曲率半径	(91)
实验十三 旋光现象及应用	(95)
实验十四 用单缝衍射测光的波长	(100)
第四章 近代实验与综合实验	(103)
实验十五 声速测量	(103)
实验十六 测定材料的导热系数	(109)
实验十七 分光计的调节及光栅常数的测定	(114)
实验十八 光的偏振现象研究	(121)
实验十九 密立根油滴实验	(124)
实验二十 迈克尔逊干涉仪	(129)
实验二十一 夫兰克—赫兹实验	(134)
实验二十二 光电效应	(139)

实验二十三	金属电子的逸出功测定	(142)
实验二十四	测普朗克常数	(149)
实验二十五	全息照相	(154)
实验二十六	白光再现反射全息图	(158)
实验二十七	塞曼效应	(160)
第五章	设计性实验	(168)
实验二十八	用谐振法测电感	(174)
实验二十九	热敏电阻特性测量及应用	(176)
实验三十	三棱镜顶角与折射率的测量	(178)
实验三十一	稳压二极管伏安特性曲线的测绘	(179)
附表		(181)

绪 论

物理学是研究物质的运动规律、物质的结构及其相互作用的科学,是自然科学中最重要、最活跃的带头学科之一。物理学的发展不仅在自身的学科体系内生长和发展出新的学科分支,而且它是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科产生、成长、发展的基础和前导。物理理论和实验的发展,哺育着近代高新技术的成长和发展,物理实验的思想、方法、技术和装置常常是自然科学研究和工程技术发展的生长点。可以说,现代高新技术的发明和突破,无不源于物理学上的重大发现,而高新技术的发展,又不断推动着实验物理研究的手段、方法和装备的发展,大大改变着人类对物质世界认识的深度和广度。

从本质上说,物理学是一门实验科学。物理规律的研究,物理学理论的产生、验证和发展,都必须以实验事实为基础,并不断受到实验的检验。物理实验是在人为条件下再现物理现象,并对现象进行观测,对测量结果进行分析的过程,是人们探索自然现象、发现物理规律、检验物理理论的有力工具,是工程技术的基础。在历史上,用实验澄清科学概念的事件不胜枚举。16世纪前,人们一直认为力是维持物体运动的原因,伽利略经过多年的潜心研究,在巧妙设计实验的基础上建立了落体定律,从而推翻了统治欧洲长达2 000年的这一错误观念。电磁学的发展更是明显地划分为三个阶段,即:由实验总结出基本定律,建立麦克斯韦方程组和实验验证方程组。麦克斯韦在前人实验工作的基础上,依靠他高超而又纯熟的数学技巧及敏锐的物理思想,于1864年建立了完整的电磁场理论,多年后又预言了电磁波的存在,但在当时并没有得到人们的普遍承认与重视。直到1888年,赫兹通过实验证实了电磁波的存在,麦克斯韦理论才被公认为科学的真理。

丁肇中教授在获诺贝尔奖颁奖仪式上说:“中国有句古话‘劳心者治人,劳力者治于人’,这种落后的思想对发展中国家的青年有很大害处。由于这种思想的影响,很多学生都倾向于理论研究而避免实验工作,我希望由于我这次得奖能够唤起发展中国家学生们的兴趣,注意实验工作的重要性。”

科学技术的迅猛发展,要求高等工科院校培养的科技人才必须具备坚实的物理基础、出色的科学实验能力和勇于开拓的创新精神。物理理论和实验课程在培养学生这些基本素质和能力方面具有不可替代的重要作用。物理实验是物理基础教学的一个重要组成部分,同时又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,是对学生进行科学实验基本训练的重要基础。这门课程内涵丰富,所覆盖的知识面和包含的信息量以及对学生进行的基本训练内容是其他课程的实验环节所不能比拟的;它对学生深入观察现象,建立合理的物理模型,定量研究变化规律,分析、判断实验结果的准确度,激发学生的想像力、创造力,培养和提高学生独立开展科学研究工作的素质和能力具有重要的奠基作用。学好物理实验课程对于高等工科院校的学生是十分重要的。

一、物理实验课的任务

大学物理实验课要在中学物理实验的基础上,按照循序渐进的原则,学习物理实验知识和

方法,得到实验技能的训练,从而初步了解科学实验的主要过程与基本方法,为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。大学物理实验课的具体任务是:

(1)通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验知识,加深对物理学原理的理解。

(2)培养和提高学生的科学实验能力。其中包括:

自学能力——能够自行阅读实验教材或资料,做好实验前的准备。

动手能力——能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器并完成实验操作。

分析能力——能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断。

表达能力——能够正确记录和处理实验数据,绘制曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告。

设计能力——能够完成简单的设计性实验。

(3)培养和提高学生的科学实验素养。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风,严肃认真的科学态度,主动研究的探索精神和遵守纪律、爱护公共财产的优良品德。

二、物理实验课的基本程序

物理实验教学过程一般包括预习、课堂操作和完成实验报告三个重要环节。

1. 预习

实验课前认真阅读实验教材或有关资料,弄清本次实验的目的,掌握原理、测试方法及实验步骤,熟悉仪器性能,在实验报告纸上写出实验预习报告。预习报告主要包括以下栏目:

实验目的——简单明确地写出本次实验的目的、要求。

实验原理——扼要地叙述实验原理,写出主要公式,画上主要示意图、电路图或光路图。

实验内容——简要地写出实验内容和操作步骤。

另外在自备的实验数据记录本上,画好数据记录表格,有时还要求自拟数据表格等。还要书面简要地回答预习思考题。

课前预习的好坏,是能否独立顺利地进行实验的关键,应认真完成。

2. 课堂操作

学生进入实验室后应严格遵守实验室规则。先要对照仪器实物,认识并熟悉主要仪器及使用方法,然后井井有条地布置好仪器。在调试正常后,严格按实验步骤进行测试并采集数据。注意细心地观察实验现象,认真研究实验中的问题。测试中仪器发生故障或发现异常现象,应及时请教老师,不可随意处理。要注意把重点放在实验能力的培养上,而不是仅仅测出几个数据就以为完成了任务。

同学们要严肃地对待测试数据,忠实地记录于事先准备好的表格之中,每个数据都应符合有效数字的要求。经老师检查不合格的数据,不得涂抹,应轻轻划上一道,在重新测定之后,另起行记录。全部数据经老师检查合格并在记录纸上签字以后,应先切断电源,再整理好仪器,并将室内收拾整洁。课堂操作至此才全部结束。

3. 撰写报告

课后,在报告纸上,接着以上预习报告的内容继续完成以下栏目:

数据表格——设计合理的表格,将整理后的数据填入表格之中。

数据处理——按实验要求计算待测量的量值和不确定度。报告上的计算过程应包括公式→代入数据→结果三个步骤,中间计算过程不写在报告上。最后写明实验结果表达式。

作图法处理数据时要符合作图规则,图线要规矩、美观。

小结或讨论——可以解答讨论思考题,也可以写上对实验现象的分析,对本次实验结果及主要误差因素的简要分析讨论,对实验关键问题的研究体会,实验的收获和建议等。

整篇实验报告应做到简明,工整,重点突出,作图规范,表格清晰。

三、实验室规则

为了完成好物理实验课的任务,取得良好的学习效果,同学们应认真遵守实验室规则:

(1)上课时须带来课前准备好的预习报告和数据记录表格,经教师检查后方可进行实验,否则不能随堂参加该次实验。

(2)遵守课堂纪律,保持安静的实验环境。

(3)使用电源时,须经教师检查线路并许可后,才能接通电源。

(4)爱护仪器。不得随意搬弄仪器,实验中严格按仪器说明书操作,如有损坏,照章赔偿。公用工具用完后立即归还原处。

(5)完成实验后,数据需经教师审查签字,然后将仪器整理还原,将桌面和凳子收拾整齐,方能离开实验室。

(6)实验报告应在实验后三天内集体送交实验室。

(7)只有全部完成教学计划规定的所有实验项目后,方能参加实验课期末考核。

第一章 测量误差与数据处理基础知识

研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理都要进行测量,测量是物理实验的基础。然而任何测量都一定存在误差,要评价测量结果的可信赖程度,必须对测量误差作出估计。了解和掌握误差理论和数据处理的初步知识,是物理实验教学和今后进行科学实验的基础。由于这部分内容牵涉面较广,对低年级学生来说难度较大,而且这方面问题的深入探讨和详细证明是数理统计学的任务,本章仅限于简要介绍这方面的初步知识,引用几个重要概念以及最简单情况下的处理方法,并作简化处理。

一、测量与误差

测量是人类认识和改造客观世界的必不可少的重要手段,它是通过一组操作来确定被测对象的量值。一般说来,测量就是把被测量与选作计量单位的同类量比较,并确定其倍数的过程。

1. 直接测量与间接测量

根据获得测量结果的不同方式,测量可以分为直接测量和间接测量两类。

(1)直接测量:有些测量量可以从测量仪器(或量具)上直接读出其量值。这种无需对被测量与其他实测的量进行函数关系的辅助计算就能直接得到被测量量值的测量方式,就是直接测量。例如用米尺量物体的长度,用天平测物体的质量,用电压表测电阻上的电压,用停表测时间间隔等,都属于直接测量。直接测量中的被测量称为直接测量量。

(2)间接测量:许多测量量没有对应的能直接读数的测量仪器,需要先由直接测量获得必需的相关数据,然后利用已知的函数关系经过运算才能得到待测量的量值,这种测量方式就是间接测量。例如测量矩形的面积,必须先用直接测量方法测出其长和宽,然后计算出面积。间接测量中的被测量称为间接测量量,上例中的矩形面积就是间接测量量。

2. 测量误差及表示方法

由于测量方法、测量仪器、测量环境、测量者的观察力以及种种因素的局限,使测量结果都可能含有误差。因此,分析测量过程中可能产生的各种误差,尽可能减小或消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差的范围作出估计,就是物理实验和其他科学实验所必不可少的工作。

测量误差简称误差,它是测量结果与待测量客观存在的真值(或约定真值)的差值。测量误差可以用绝对误差和相对误差两种方法表示,它反映出测量结果的准确程度。

$$\text{绝对误差} = \text{测量结果} - \text{被测量的真值} \quad (0-1)$$

$$\text{相对误差} = \frac{\text{测量的绝对误差}}{\text{被测量的真值}} \quad (\text{用百分数表示}) \quad (0-2)$$

真值是指在确定条件下,反映任何物质(物体)物理特性的物理量所具有的客观真实数值。被测量的真值是一个理想的概念,一般说来是不知道的,实际测量中常采用已修正过的被测量的算术平均值来代替真值,称为约定真值。

3. 误差的分类

误差主要分为两类:系统误差和随机误差。它们产生的原因和性质不同,处理方法也不同。

(1)系统误差:系统误差的特点是,在确定条件下多次测量同一物理量时,误差的数值和符号保持恒定,或者在条件改变时,误差按一定规律变化。例如,由于仪器本身存在固有缺陷(刻度不准,零点没调准,砝码未校准等);由于环境(温度、湿度等)偏离了预计的情况;由于观察者个人生理因素或不良习惯的限制(有人读数总是习惯性偏高或偏低,感觉器官的反应速度和心理特点差异等);由于测量原理的近似性或测量方法与理论要求的不一致(如伏安法测量电阻时,表头内阻对结果的影响)等,都可能产生系统误差分量。

从理论上讲,由于任何一种系统误差的发生都有其确定的原因,只要找到系统误差产生的原因,并设法加以校正,就能消除系统误差的影响。但完全发现和减少实际存在的系统误差是比较困难的工作,需要对整个实验所依据的原理、方法、测量步骤、使用的仪器、仪表等可能引起系统误差的因素进行详尽分析,并通过校准仪器,改进实验装置和实验方法,或对测量结果进行理论上的修正来消除或尽可能减少系统误差分量。

在教学实验中,由于条件的限制,难以完全消除系统误差分量,但在评估实验结果时,应对系统误差分量进行认真的分析和估计。

(2)随机误差:随机误差的特点是,在相同条件下对同一被测量多次测量过程中,误差的绝对值和符号以不可预知的方式变化。这种误差的来源在于实验中各种偶然因素的微小的随机性的波动,例如测量过程中环境条件的微小变动,观察者在操作调整仪器设备和判断、估计读数上的微小变动,测量仪器指示数值的微小变动和被测对象自身的微小变动等。对于某一次测量来说,随机误差的大小和符号是无法预知的,然而在对同一量进行大量的测量后又会发现,其随机误差的分布服从一定的统计规律,且大多数随机误差分布具有抵偿性。其中最常用、最典型的一种分布规律是正态分布律,其特点是:正方向误差和负方向误差出现的机会相等;数值较小的误差出现的次数较多;在没有错误的情况下,很大的误差通常不出现;当测量次数无限增多时,随机误差的正负值互相抵消,即随机误差的算术平均值趋于零。因此,增加测量次数,可以减少随机误差分量。

通常用以下几个概念定性地表述各类误差的大小:

(1)精密度(Precision):表示测量数据密集的程度。它反映随机误差的大小,与系统误差无关。若各测量值之间的差异较小,即数据集中,随机误差小,意味着测量精密度较高。反之,若各次测量值彼此差异较大,精密度也就较低。

(2)正确度(Correctness):表示测量结果与真值符合的程度。它反映了系统误差的大小,与随机误差无关。若多次测量的平均值对真值的偏离小,即系统误差小,意味着测量的正确度较高。

(3)准确度(Accuracy):是对测量中的偶然误差和系统误差的综合评价。若测量数据比较集中而且接近真值,即系统误差和随机误差都较小,称为测量的准确度高。

利用图 0-1 中的三个靶图,可以形象地表明三个名词的意义。(a)图表示精密度高而正确度低;(b)图表示正确度高而精密度低;(c)图表示精密度和正确度都高,即准确度高。

(4)精度:精度不是一个确切定义的名词,一般情况下多指准确度,有时用于简略定性地说明问题。

在测量条件相同的情况下进行的一系列测量称为等精度测量。例如同一个人在同样的环境条件下在同一仪器上采用同样的测量方法对同一被测量进行多次测量,没有任何理由认为某个测量值比另一个测量值更为准确,即每次测量的可靠程度都相同。这些测量就是等精度测量。在对同一量进行多次测量的过程中,若改变测量条件,如更换仪器,更换测量参数,更换测量人员等,那么在测量条件变更前后,测量结果的准确度不会相同。这样的测量系列就称为

不等精度测量。

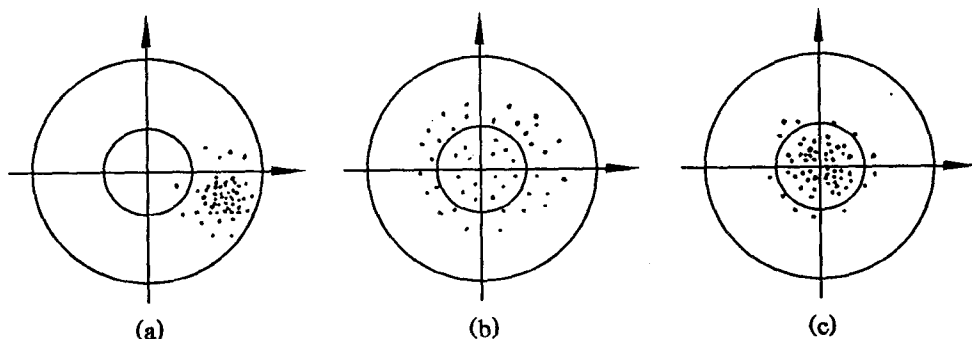


图 0-1 子弹着靶点分布图

大学物理实验一般都是采用等精度测量。

4. 随机误差的评定

对测量中的随机误差分量如何处理呢？根据随机误差的分布特性，在多次测量时正、负随机误差可以大致相消，因此，为了减少随机误差分量的影响，可以用多次测量的算术平均值表示测量结果。

设在测量条件相同的情况下，对某一物理量进行 n 次无明显系统误差的独立测量，测得 n 个测量值 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 。那么，它们的算术平均值是

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (0-3)$$

为了书写简洁，我们常略去总和号上的求和范围，例如上式中的分子可以写为 $\sum X_i$ 。

可以证明：当系统误差分量已被消除时，多次测量值的平均值是被测量真值的最佳近似值，测量次数越多，接近的程度越好，当 $n \rightarrow \infty$ 时，平均值逼近真值，因此我们用平均值表示测量结果。

测量值的分散程度直接体现了随机误差分量的大小，测量值越分散，测量的随机误差分量就越大。为了表示测量的精密度，必须对测量的随机误差分量作出估计。对随机误差分量作估计的方法有多种，科学实验中常用标准偏差来估计测量的随机误差。

每一次测量值 X_i 与平均值 $\bar{X}$ 之差称为偏差：

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (0-4)$$

偏差有正有负，有大有小，通常用“方均根”方法对它们进行统计计算，得到的结果就是单次测量值的标准偏差：

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (\Delta X_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (0-5)$$

我们可以用这一标准偏差表示测量值的分散性，用以表示随机误差的分布特征。标准偏差小表示测量值很密集，测量的精密度高，标准偏差大表示测量值很分散，即测量的精密度低。

很多计算器具有这种统计计算功能，我们可以直接用计算器求得 S_x 等数值。

二、直接测量结果的表示和不确定度的估计

为了统一评定测量结果可信赖程度的方法，1993 年初国际标准化组织 (ISO) 以七个国际组

织的名义公布了《测量不确定度表示指南》(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement),这是计量学的一个重大发展。普通物理实验中,一般只要求学生了解不确定度的概念。依据以上《指南》的精神,本书采用了一种简化的具有一定近似性的不确定度估计方法。

不确定度(Uncertainty)是指由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度,是表征被测量的真值所处量值范围的评定,表征合理地赋予被测量值的分散性。要完整地表示测量结果,除了给出被测量的量值 X_0 外,还须同时给出不确定度 Δ ,写成以下表达式:

$$X = X_0 \pm \Delta \quad (0-6)$$

该式表明被测量的真值在 $(X_0 - \Delta, X_0 + \Delta)$ 的范围之外的可能性(概率)很小。

在测量结果中指出不确定度,其目的在于说明测量结果的可信赖程度。我们不可能用标明误差的方法去说明可信赖程度,因为测量误差是引用的测量结果与被测量的真值之差,而真值一般不知道,因而测量误差也是未知的。不确定度表示的是测量误差可能出现的范围,在测量值 X_0 附近的一个范围 Δ 内,真值以一定的概率落在其中,也就是说,真值以一定的概率落在 $(X_0 - \Delta, X_0 + \Delta)$ 区间之内。不确定度越小,表示误差的可能值越小,测量的可信赖程度越高。

1. 测量值 X_0 的计算

对于等精度的 n 次测量,测量值 X_0 一般取为多次测量的平均值 $\bar{X}$,即用被测量的最佳近似值 $\bar{X}$ 表示,有时实验中只能测一次或只需测一次,那就取该次测量值 X 。

认真分析系统误差的影响后,还须对多次测量的算术平均值(或一次测量值)进行修正,将已定系统误差分量(即绝对值和符号都确定的已估算出的误差分量)从测量结果中减去,以修正后的值作为测量值 X_0 ,例如螺旋测微计的零点修正等。

2. 不确定度的估计

普通物理实验的测量结果表示式中,我们采用不确定度 Δ ,表示 X 位于区间 $(X_0 - \Delta, X_0 + \Delta)$ 内的可能性置信(概率)约等于或大于 95%。按照估算方法的不同,不确定度的分量分为两类:

A 类不确定度分量 Δ_A :多次重复测量后,用统计方法计算出的不确定度分量。

B 类不确定度分量 Δ_B :由不同于 A 类分量的其他方法(例如查资料)得到的不确定度分量。

不确定度由这两类不确定度分量用方和根方法合成得到:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (0-7)$$

本书中取单次测量的标准偏差 S_X 的值作为 Δ_A 。

我们约定,在大多数情况下,物理实验中就把仪器误差限值 Δ_{ix} 简化地直接当作不确定度 Δ 中用非统计方法估计的分量 Δ_B ,而忽略了其他因素的影响。这样,由(0-7)式可得:

$$\Delta = \sqrt{S_X^2 + \Delta_{ix}^2} \quad * \quad (0-8)$$

3. 仪器误差限值的估计

产生仪器误差的诸多因素及具体误差分量的计算分析,大多超出了本课程的要求范围,作为简化表示,通常取仪器误差限值 Δ_{ix} 等于仪表、器具的示值误差限或基本误差限,在物理实验中,有的是由生产厂家按照国家标准规定的准确度等级或允许误差范围给出,有的是由实验室结合具体测量方法和条件给定。

(1)仪器的基本误差限通常可以在仪器说明书或技术标准中查到,为方便初学物理实验的同学,下面列出几种常用仪器的示值误差限。

仪 器	量 程	分 度 值	示值误差限
钢直尺	300mm	1mm	$\pm 0.1\text{mm}$
钢卷尺	1m	1mm	$\pm 0.5\text{mm}$
	2m	1mm	$\pm 1\text{mm}$
游标卡尺	150, 200, 300mm	0.02, 0.05, 0.1mm	与分度值相同
螺旋测微计	25, 50, 75, 100mm	0.01mm	1 级 $\pm 0.004\text{mm}$

(2)电测量指示仪表的基本误差限值与仪表的准确度等级有关。电测量仪表的准确度等级分为七级:0.1,0.2,0.5,1.0,1.5,2.5,5.0。由仪表的准确度等级与所用量程可以推算出仪表的基本误差限:

$$\Delta_{\text{仪}} = \text{量程} \times \text{准确度等级}/100 \quad (0-9)$$

电学仪表的准确度等级通常都刻写在度盘上,使用时应记下其准确度等级,以便计算 $\Delta_{\text{仪}}$ 。

例1 有一电流值约为 2.5A,现分别用量程为 3A 和 30A、准确度等级均为 0.5 级的电流表进行测量,试估计 B 类不确定度分量 Δ_{B} 。

解:按式(0-9),量程为 3A 时,

$$\Delta_{\text{B}} = \Delta_{\text{仪}} = 3 \times 0.5/100 = 0.015(\text{A})$$

量程为 30A 时,

$$\Delta'_{\text{B}} = \Delta'_{\text{仪}} = 30 \times 0.5/100 = 0.15(\text{A})$$

(3)数字显示仪表通常取其最小分度作为其仪器误差限。

(4)本书中,对于未加说明的仪器,一般取仪器最小分度的一半作为其仪器误差限。

物理实验室所用的仪器,在相同条件下对同一被测量作多次直接测量时,测量值的标准偏差 S_x 常常比所用仪表器具的基本误差限小,当 $S_x < \frac{1}{3} \Delta_{\text{仪}}$,且测量次数大于 5 时,不确定度 Δ 可以简单地只用仪器误差限值 $\Delta_{\text{仪}}$ 来表示。

有时因条件限制只能进行一次测量,或实验中允许降低对这个量的精度要求只需进行一次测量时,这时 A 类分量 Δ_{A} 虽然存在,但不能用(0-5)式算出 S_x , Δ 也可以简单地用仪器误差限值 $\Delta_{\text{仪}}$ 来表示。

4. 相对不确定度的估算

类似(0-2)式,相对不确定度 Δ_r 可以由下式得出:

$$\Delta_r = \frac{\Delta}{X_0} \quad (0-10)$$

三、间接测量结果的表示和不确定度计算

间接测量结果是由直接测量结果代入一定的数学函数式计算得到的,所以直接测量结果的不确定度必然给间接测量结果带来影响。间接测量结果的不确定度可以根据相应的函数关系式计算出来。

设间接测量量 N 可以写成 K 个独立的直接测量量 $X, Y, Z, \dots$ 的函数:

$$N = f(X, Y, Z, \dots)$$

按照误差的全微分表达式:

$$dN = \frac{\partial f}{\partial X} dX + \frac{\partial f}{\partial Y} dY + \frac{\partial f}{\partial Z} dZ + \dots \quad (0-11)$$

式中 $dN, dX, dY, dZ, \dots$ 分别表示 N 及各直接测量量 $X, Y, Z, \dots$ 的误差。式(0-11)是直接测量量的误差传递给间接测量量的误差的代数和传递式。

在各直接测量量互相独立的前提下,经过数学严密推导,由(0-11)式可以导出标准偏差 S_N 的方和根合成式:

$$S_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)^2 S_X^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Y}\right)^2 S_Y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Z}\right)^2 S_Z^2 + \dots} \quad (0-12)$$

从式(0-12)出发,人们公认: N 的一种以标准偏差形式表示的不确定度,其合成(传递)公式形式同式(0-12),也是各分量与偏导数之积的方和根。在物理实验中,我们也采用和式(0-12)形式相同的不确定度传递的近似公式:

$$\Delta_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)^2 \Delta_X^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Y}\right)^2 \Delta_Y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Z}\right)^2 \Delta_Z^2 + \dots} \quad (0-13)$$

式(0-13)是不确定度合成的基本关系式。式中 $\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z, \dots$ 是各直接测量量的不确定度。 N 的不确定度等于各直接测量分量的不确定度与相应偏导数乘积的方和根。

对原函数式取对数计算后,还可类似得到不确定度的相对值,即相对不确定度的表达式:

$$\Delta_r = \frac{\Delta_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial X}\right)^2 \Delta_X^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial Y}\right)^2 \Delta_Y^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial Z}\right)^2 \Delta_Z^2 + \dots} \quad (0-14)$$

对于仅仅只含积商形式的函数,运用式(0-14)计算不确定度比较简便。

在一些简单的测量问题中也可采用绝对值合成的方法,即:

$$\Delta_N = \left| \frac{\partial f}{\partial X} \Delta_X \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial Y} \Delta_Y \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial Z} \Delta_Z \right| + \dots \quad (0-15)$$

$$\frac{\Delta_N}{N} = \left| \frac{\partial \ln f}{\partial X} \Delta_X \right| + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial Y} \Delta_Y \right| + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial Z} \Delta_Z \right| + \dots \quad (0-16)$$

这种合成方法所得结果一般偏大,与实际的不确定度合成情况可能有较大出入。但因计算简便,在项数较少或系统误差为主的实验中可作为一种简化的处理方法。

例2 已知 $N = aX + bY + cZ$, 且各直接测量量的不确定度分别为 $\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z$, 求 N 的不确定度。

$$\text{解: } \because \frac{\partial N}{\partial X} = a, \frac{\partial N}{\partial Y} = b, \frac{\partial N}{\partial Z} = c$$

$$\therefore \text{由式(0-13)可知, } \Delta_N = \sqrt{a^2(\Delta_X)^2 + b^2(\Delta_Y)^2 + c^2(\Delta_Z)^2}$$

由此可见,和、差的不确定度可利用各项不确定度用方和根方法合成得到。

例3 已知 $N = X \cdot Y \cdot Z$, 及 $\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z$, 求 N 的不确定度。

解: 可以先作简单分析如下:

$$\text{将函数式取对数: } \ln N = \ln X + \ln Y + \ln Z$$

$$\text{由微分式, } \therefore \frac{dN}{N} = \frac{dX}{X} + \frac{dY}{Y} + \frac{dZ}{Z}$$

用“方和根”方法合成可得到不确定度的相对值 Δ_r :

$$\Delta_r = \frac{\Delta_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_X}{X}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_Y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_Z}{Z}\right)^2}$$

$$\therefore \Delta_N = N \cdot \Delta_r$$

因此,单纯积或商的不确定度的相对值 $\frac{\Delta_N}{N}$, 可利用各因子的相对不确定度,用“方和根”方

法合成得到。

例4 已知某圆环的外径 $D_2 = 10.012 \pm 0.004\text{cm}$, 内径 $D_1 = 7.986 \pm 0.004\text{cm}$, 高度 $h = 2.124 \pm 0.004\text{cm}$, 求环的体积和不确定度 Δ_V 。

$$\begin{aligned}\text{解: 环体积为: } V &= \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) h \\ &= \frac{\pi}{4} (10.012^2 - 7.986^2) \times 2.124 \\ &= 60.829 (\text{cm}^3)\end{aligned}$$

环体积取对数后求其微分式:

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

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

代入方和根合成公式(0-14):

$$\begin{aligned}\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 &= \left(\frac{2D_2 \Delta_{D_2}}{D_2^2 - D_1^2}\right)^2 + \left(\frac{2D_1 \Delta_{D_1}}{D_2^2 - D_1^2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_h}{h}\right)^2 \\ &= \left(\frac{2 \times 10.012 \times 0.004}{10.012^2 - 7.986^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 7.986 \times 0.004}{10.012^2 - 7.986^2}\right)^2 + \left(\frac{0.004}{2.124}\right)^2 \\ &= 11.44 \times 10^{-6}\end{aligned}$$

$$\frac{\Delta_V}{V} = (11.44 \times 10^{-6})^{\frac{1}{2}} = 0.0034 = 0.34\%$$

$$\Delta_V = V \cdot \frac{\Delta_V}{V} = 60.829 \times 0.34\% \approx 0.21 (\text{cm}^3) \quad (\text{或取 } \Delta_V \approx 0.2 \text{cm}^3)$$

$$\text{因此环体积为: } V = (60.83 \pm 0.21) \text{cm}^3 \quad [\text{或 } V = (60.8 \pm 0.2) \text{cm}^3]$$

四、测量结果的有效数字

实验中我们得到的测量数据都是含有误差的数值,对这些数值不能随意取舍,应反映出测量值的准确度,因此记录测量数据、计算及表示测量结果时,对所记数据的位数有严格的要求,应能大致反映出测量误差或不确定度的大小。

直接测量时,我们可以将测量值准确地读到仪器的最小分格,即读出准确数字,然后再在最小分度值下估读一位数,常估读到最小分度值的十分之一,这是存疑数字。

例如用 300mm 长的毫米分度钢直尺测量某长度,正确的读法除了确切地读出有刻线的位数之外,还应估读一位,即读到 1/10mm。如测得某长度为 34.7mm,这表明 34 是准确数字,而最后的 7 是估读数字,应记为 34.7mm。若记为 34.70mm 则是错误的,后一种记法把数字“0”当作估读数字,不符合测量仪器实际的准确度。同样的道理,若用该钢直尺测得某长度正好是 35mm,应当记为 35.0mm,因为 35 是准确数字,而读出最小分度值后的估读数字是“0”。

表示间接测量结果时,要根据不确定度所在的数位来判断存疑数字。例如根据长度和直径的测量值用计算器算出的圆柱体体积为 $V = 5836.2401 \text{mm}^3$, $\Delta_V = \pm 4 \text{mm}^3$ 。根据不确定度为 4mm^3 可知,个位数字 6 已经是不准确的,它后面的四位数字 2401 就没有必要保留。因此圆柱体体积的间接测量值应写作: $V = 5836 \pm 4 \text{mm}^3$ 。5836 这四位数字前面的三位是准确数字,后面一位是存疑数字。

准确数字和存疑数字的全体称为有效数字。以上各例中 34.7mm 为三位有效数字,35.0