

21

世纪高等院校教材

大学物理实验

贺淑莉 主 编

刘战存 何敬锁 王一红 编

 科学出版社
www.sciencep.com

21 世纪高等院校教材

大学物理实验

贺淑莉 主编

刘战存 何敬锁 王一红 编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在保留传统的基础实验的基础上,增加了磁阻效应、光纤径向模场分布、核磁共振等与物理学研究领域内的热点密切相关的实验及微波的布拉格衍射、弗兰克-赫兹、密立根油滴等曾获得诺贝尔物理学奖的著名实验,便于学生理解物理学家的创新思路。

本书可作为普通和师范类院校非物理专业“大学物理实验”课程的教学用书,也可作为从事实验教学的教师和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/贺淑莉主编. —北京:科学出版社,2006

21 世纪高等院校教材

ISBN 7-03-016744-9

I. 大… II. 贺… III. 物理学-实验-高等学校-教材 IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 000085 号

责任编辑:刘俊来 贾 杨 / 责任校对:朱光光

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

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>

西露印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 2 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 2 月第一次印刷 印张: 9 3/4

印数:1—3 000 字数: 181 000

定价: 15.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

在科技发展日新月异的今天,实验物理学得到了突飞猛进的发展,为了让学生及时了解实验物理的新进展,《大学物理实验》这本书吸取了国内外同类教材的精华,在保留传统的基础实验题目的基础上,增加了近代物理实验以及与现代实验技术相关的当今物理学领域内最新进展的实验题目,将基础性和先进性有机地结合起来,符合当今教育发展的基本指导思想.

本书中增加了与当今物理学研究领域内的热点密切相关的实验题目,例如目前与磁记录领域相关的磁阻效应实验、有关光纤通讯领域内的光纤径向模场分布实验、目前在医疗领域和高端测试领域内应用广泛的核磁共振实验等.这些实验内容被作为大学物理实验的题目不仅可以及时地让学生接触实验物理的最新进展,同时也可以激发学生的学习兴趣.本书还选入了微波的布拉格衍射、弗兰克-赫兹实验、密立根油滴实验等曾获得诺贝尔物理奖的著名实验,便于学生理解物理学家的创新思路,有益于培养学生的创新能力.

本书中的多数实验题目均安排了必做内容和选做内容,这样可以使不同层次学生的实验能力均得到充分的提高和锻炼,做到因材施教.另外,本书中还增加了综合性、设计性实验题目,注重培养学生分析问题及独立解决问题的能力,注重培养学生思考问题的习惯,适应当今素质教育的要求.在实验的开始介绍与相关的物理学史的知识 and 该实验的应用前景,使学生对实验有更加全面和深入的理解.

本书是一本师范院校非物理专业使用的物理实验教材,我们参考国外中学教师的培养思想,努力将当今物理学的新进展及时引入师范生物理实验的课堂教学当中.

本书由首都师范大学物理实验教学中心的部分任课老师编写,由贺淑莉主编,具体分工:贺淑莉(电学实验基础及实验二、三、四、五、七、十、十二、十三),刘战存(第一章中第一节至第六节及实验十七、十八、十九、二十),何敬锁(实验一、八、十四、十五、十六),王一红(实验六、九、十一).在本书的编写和出版过程中得到了首都师范大学教务处、条装处及物理系领导的大力支持,我们在此表示深深的谢意.

特别感谢教育部教学指导委员会实验物理教学组组长、北京大学物理实验中心主任段家骝教授在百忙之中审阅书稿并提出宝贵意见.

由于编者水平所限,书中难免存在错误和不妥之处,恳切希望广大教师和读者不吝指正.

编 者
2005 年 12 月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 测量误差与数据处理及实验基础知识	6
第一节 测量与误差	6
第二节 测量结果的评定和不确定度	11
第三节 直接测量量的不确定度计算	12
第四节 间接测量量的不确定度计算	13
第五节 有效数字	15
第六节 常用的实验数据处理方法	17
第七节 电学实验基础	24
第三章 实验部分	32
实验一 杨氏弹性模量的测定	32
实验二 惯性秤	38
实验三 物体的密度测定	43
实验四 伏安法测非线性电阻	50
实验五 惠斯通电桥	54
实验六 静电场的描绘	60
实验七 霍尔效应及磁场的测定	66
实验八 示波器的原理和使用	74
实验九 地磁场水平分量的测量	80
实验十 磁阻效应	85
实验十一 电表的改装与校准	89
实验十二 铁磁材料居里温度的测定	94
实验十三 超声法测声速	99
实验十四 全息照相	105
实验十五 迈克耳孙干涉仪的调节和激光波长测定	110
实验十六 光纤纤端光场径向分布的测试	115
实验十七 微波的布拉格衍射	119
实验十八 弗兰克-赫兹实验	126
实验十九 密立根油滴实验	134
实验二十 核磁共振	140

第一章 绪 论

一、大学物理实验课的重要性

物理实验是理工科学生进行科学实验基本训练的一门基础课程,是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端。

物理学是研究物质运动的普遍性质和基本规律的科学,物理学研究的运动形式是自然科学中最基本、最普遍的,因而物理学的理论和规律以及研究方法具有最普遍、最基本的实际意义。物理学是一门实验的科学。任何物理概念的确立,物理规律的发现,都必须以严格的科学实验为基础;人们提出的理论是否正确,又必须通过科学实验来检验。物理实验的一些实验理论和方法已经渗透到了自然科学的各个学科和工程技术的各个领域。因而,对于非物理专业的同学来说,学好物理学,学好物理实验,与学好本专业的课程是同样重要的。

实验是人们根据研究的目的,运用科学仪器,人为地控制、创造和纯化某种自然过程,使之按预期的进程发展。同时在尽可能减少干扰的情况下,进行定性或定量的观测,以探求该自然过程变化规律的一种科学活动。一般的观察只是被动等待自然界按其本来的进程发展,人们仅仅对现象进行记录和研究。可见实验和观察是不同层次的认识手段,起着不同的作用。

实验与生产劳动也有根本的区别,实验是科学理论指导下的探索活动,离不开理论思维和分析判断。因此,实验首先强调是动脑能力,其次才是动手能力的培养。生产劳动是以直接变革自然、增加物质财富为目的,并不要求有科学成果。虽然实验中也有劳动成分,但与生产劳动的目的和作用完全不同。

二、物理实验课的主要环节

物理实验课是在教师指导下独立进行实验的一种实践活动,无论实验内容的要求或研究的对象有何不同,其基本程序大致是相同的,一般包括三个环节。

1. 课前预习

实验课前要仔细阅读教材中的有关内容(必要时还需查阅有关参考资料),理解本次实验的目的、原理、所要用的实验仪器,弄清楚要观察哪些现象,测量哪些物理量,了解实验要求和注意事项。在此基础上写出简要的预习报告。预习报告包括:

实验名称、仪器装置、目的、简要的原理(画出实验原理图——特别是电路图和光路图,列出实验所依据的理论公式),并画出数据表格.有些实验还要求学生自己设计拟定实验方案,自己设计电路图或光路图.因此课前预习的好坏是能否顺利、主动进行实验的关键.

2. 实验操作

认真听取教师对本次实验的要求、重点、难点、操作规程、注意事项的讲解;认识和熟悉仪器,了解使用方法,记录规格型号.在实验室要遵守有关的规章制度和守则,爱护仪器设备,注意安全.

注意做好仪器的调节,在力学、热学实验中一些仪器使用前往往要求调到水平或垂直状态;电磁学实验中,连接电路前要注意布局合理;连好电路后,先将仪器调节到“安全位”,经教师检查无误后方可接通电源.光学实验更要特别注意仪器的调整,一定要将仪器调整到最佳状态再开始测量;仪器调整不好往往不能进行测量,即使勉强能测量误差也一定很大.

实验中一定要仔细观察,积极思考.要做到脑手并用,要多动脑筋,脑子里要有清楚的物理图像,对实验中可能出现的现象应有一定的估计,对实验中出现的现象要认真考虑,想一想是否合乎物理规律.遇到问题要冷静分析,不要急躁.实验中若出现不正常的情况,要及时向教师请教,不要自己随意处理.如果对实验有新的想法或想进一步深入研究,须经指导教师同意后才可进行.

实验中要记录好原始数据.实验记录是计算结果和分析问题的依据,要一边测量,一边及时记录;要把数据细心完整地记录在预习报告上,记录时要用圆珠笔、钢笔或签字笔,不得使用铅笔记录数据.不要把数据先记在草稿纸上,然后再誊写在表格内,这是一种不科学的习惯.实验完毕,要将记录的数据交给教师检查,得到认可后,再将仪器整理复原,方可离开实验室.

实验中要特别注意安全,用电要注意弄清电源电压、仪器的用电要求,插、拔电源插头时要特别小心;在光学实验中使用激光器时要特别注意不得用眼睛去看未经扩束的激光束,以免损伤视力.

3. 写好实验报告

实验报告是对实验的全面总结,是交流实验经验的材料.要写好实验报告,就需要认真学习与掌握实验原理和方法,正确地分析和处理数据,正确地表达测量结果,并对结果做出合理的分析和讨论.

实验报告一般包括:实验名称、实验目的、仪器用具、实验原理(用自己的语言简要叙述,并附有必要的公式、电路图或光路图)、数据及结果等.要用指定的报告纸并按规定的格式写实验报告.要求字迹清晰、文理通顺、数据齐全、图表规范,结

论明确.实验报告要按时交给教师.

4. 注重能力的培养

做实验不能只是为了测几个数据,我们要通过物理实验,深入掌握实验的物理思想,物理量变化的规律,实验要求的条件,学会实验仪器的使用方法,得出正确的实验结果;要在实验中培养自己的观察能力、分析和解决问题的能力、研究能力以及综合设计能力.

具有敏锐的观察能力,才有可能观察到重要的实验现象.X射线的发现者、第一届诺贝尔物理奖获得者伦琴(Wilhelm Conrad Röntgen, 1845—1923)在进行阴极射线的实验时,气体放电管(勒纳德管)发生了泄漏,他用另一个厚壁的气体放电管(克鲁克斯管)代替它.熄灭了照明灯,接通感应圈,看看会不会有光从他制作的遮光罩中跑出来.结果没有发现漏光现象,他很满意,准备先断开电流,再做下一步实验.突然,他发现在黑暗中距离放电管约1m远处的长凳上发出微弱的闪光.关断电源,闪光随即消逝;再次加上电压,闪光重新出现.划着火柴一看,原来是涂有荧光物质的纸屏上出现的闪光,现象出人意料.他设想闪光与管子有关,实验肯定了他的想法,当纸屏距离移远到2m处时仍有荧光.他注意到无论纸屏涂有荧光物质的一面朝向或背对放电管都同样有荧光.伦琴马上意识到这是一种新的别人没有报道过的不可见光,他将其称为X射线(后来被人们称为伦琴射线).他后来又进行了一系列实验,研究X射线的性质.试想,假如他没有超人的观察能力,对微弱的荧光没有充分重视,不就错过了一个最重要的发现吗?实际上在伦琴之前,就有不少人发现过一些和X射线有关的实验现象,但是由于观察不细致,让这些现象白白溜走了.我们在实验中,要像伦琴那样善于和捕捉观察那些稍纵即逝的实验现象,培养观察能力.

在实验中培养我们分析问题的能力.对同一个现象,经过认真分析可以得出重要的结论,不认真分析就有可能一无所获.英国物理学家、1917年诺贝尔物理奖获得者巴克拉(Charles Glover Barkla, 1877—1944),测量了多种物质对X射线的吸收情况,即测定X射线穿过不同厚度的铝片和其他物质后的强度.他发现对X射线的某些成分,吸收系数为常数,即与厚度无关,这种辐射称为均匀辐射,就是标识辐射.通过一系列巧妙的实验,巴克拉推断,元素受入射X射线激发时放射出两种特征辐射,他称之为K辐射和L辐射.当时他所能应用的确定辐射性质的唯一方法,就是测量吸收.能从吸收的规律中分析出X射线的光谱结构,这样的分析可以说是“入木三分”,非常深刻.分析是要在深入事物的内部,掌握各个细节的同时,排除各种干扰和影响因素,透过事物的现象揭示本质和规律.我们要在实验中养成分析问题的习惯,遇到问题都想一下“为什么”,使分析能力逐渐提高.

培养研究和创新能力.有的同学习惯于照着书上给出的实验步骤一步一步做,

做一步,看一步.做完实验,合上书本,脑子里什么也没有剩下.我们提倡同学在实验中研究问题,从实验的器材装置到实验的方法,从仪器调整到实验数据的测量,从实验电路的选择到仪器装置的合理利用等等都是值得考虑的.同一个物理量,使用相同的装置测量,可以有不同的方法.例如用分光计测量三棱镜的顶角,可以利用望远镜找出其法线测量,也可以由准直管发出的平行光经过望远镜测量.我们提倡同学之间、同学和老师之间的交流,但是反对事无巨细,全都去问别人,自己不做任何思考;我们主张以自己的思考为主,实在想不出来,看书也解决不了的问题再去问.我们做的教学实验,虽然多是比较成熟的实验,但只要肯于思考,认真研究,都有一定的发挥和创新余地.

培养综合设计能力.教学实验是要通过基础的实验培养实验能力,只去验证别人的实验结果不是我们的最终目的.我们要学会设计实验,学习用实验解决实践中遇到的问题.例如有的电学实验中用到的电压表、电流表,需要测定它的内阻,在我们学习了电桥法测电阻的实验后,能否自己设计测定电表的内阻的实验?当然设计实验时,应当考虑到各种条件的限制,如电流表内阻较小,同时允许通过的电流强度又受到量程的限制.在我们的实验中,安排了一些设计性实验的题目,希望同学充分发挥出自己的聪明才智,设计出自己的实验来.同时也要注意综合能力的培养.有的同学擅长接电路,再难的电学试验也不怕,但一碰到调整光学仪器就不知从何下手了.的确,光学实验仪器的调整与电学仪器调整的规律和方法完全不同,但是近年来的物理实验技术正在向综合性发展,力学实验中多处用到传感器,计算机采集和处理数据在物理实验中也日益增多,很多实验是集光学、电学、力学的方法于一体.因此,同学们应当增强自己的综合能力.

5. 培养实事求是、一丝不苟的作风

要尊重事实,不能因为与实验规律不符而修改实验数据.著名物理学家瑞利为我们树立了很好的榜样.瑞利(Lord Rayleigh, 1842—1919)在研究氮气密度的实验中,发现用两种不同方法制取的氮气密度值相差了千分之一.他没有将这一差别简单随意地归结为实验误差,而是进行了多次不同的实验,经过多年的不懈努力,发现了惰性气体氩,并为发现其他惰性气体开辟了道路,为此获得了1904年诺贝尔物理奖.他在诺贝尔奖讲演中说:“实验工作者有一条好规矩:当差值一开始就存在时,我们总是要设法放大这个差值,而不是凭感情放弃它.”如果瑞利没有一丝不苟的作风,他就会失去一次做出重要发现的机会.瑞利就是通过严密的思考,精确的实验,完全靠着这种一丝不苟的精神才实现自己的创新的.

6. 注意理论与实验的结合

物理学是一门基础科学,非物理专业的同学做物理实验,是要通过实验学习基

本的实验方法和实验技术,更深刻地理解理论与实验的关系,培养科学的思想方法.一般地说,物理学的很多理论,是在一定的实验事实基础上总结概括出来的.但也有些理论,是先提出一些假说,如果能够经过实验的检验和证明,就可以成为大家公认的理论,如果被实验证明是错了的,就需要对假说进行修改或推翻.理论对实验又具有一定的指导作用,对实验中的现象,要用理论去分析研究.尤其是教学实验更需要理论的指导.1923年诺贝尔物理奖获得者密立根(Robert Andrews Millikan, 1868—1953)在他的获奖演说中这样说:“科学是用理论和实验这两只脚前进的,有时这只脚先迈出一步,有时是另一只脚先迈出一步,但是前进要靠两只脚;先建立理论然后做实验,或者是先在实验中得出了新的关系,然后再迈出理论这只脚并推动实验前进,如此不断交替进行.”他用非常形象的比喻说明了理论和实验在科学发展中的作用.作为一名实验物理学家,他不但重视实验,也极为重视理论的指导作用,成为我们的楷模.

美籍华裔著名物理学家丁肇中(Samuel C. C. Ting, 1936—)与美国物理学家里奇特(Burton Richter, 1931—)因发现 J/ψ 粒子而分享了1976年的诺贝尔物理奖.在斯德哥尔摩举行的发奖宴会上,丁肇中用中文作了一个简短的演说,其中讲道:“得到诺贝尔奖是一个科学家最大的荣誉.我是在旧中国长大的,因此想借这个机会向发展中国的青年们强调实验工作的重要性.

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的青年们有很大害处.由于这种思想,很多在发展中国家的学生都倾向于理论的研究,而避免实验工作.

事实上,自然科学理论不能离开实验的基础,特别是物理学是从实验产生的.

我希望由于我这次得奖,能够唤起发展中国家的学生们的兴趣,从而注意实验工作的重要性.”

丁肇中教授的这一席话,是对多年科学研究实践的总结,值得我们深思,这一席话激发我们重视实验,学好实验,做好实验,从实验中学习物理学的科学方法.在我们即将开始物理学实验的时候,我们还想起了美国俄亥俄州立大学 E. L. J. Jossem 教授讲过的一句话:“I hear and I forget, I see and I remember, I do and I understand.”译成汉语即“我只听,易忘记;我看过,易牢记;我做过,易掌握.”他说明了亲眼看到实验现象和亲手做实验有多么重要.相信同学们一定能够通过自己亲手实验,对物理学的原理和方法有更深入的理解,为学习各门专业课打好基础.

第二章 测量误差与数据处理 及实验基础知识

第一节 测量与误差

进行物理实验时,不仅要定性地观察物理变化的过程,而且还要对物理量的大小进行定量的测量.为了进行测量,必须规定一些标准单位,如选定质量的单位为千克(kg),长度的单位为米(m),时间的单位为秒(s).测量就是将待测量与相应的标准单位进行比较,将比较得到的倍数附上单位即得到该物理量的测量值.例如我们测量一根细钢丝的直径,可以选用毫米(mm)做单位,选用螺旋测微计(千分尺)作为量具,直径的测量值为0.253mm.

一、国际单位制

作为比较标准的测量单位的大小是科学的人为规定的,以某几个选定的基本单位为基础,就可以推导出一些导出单位,这一系列基本单位和导出单位的整体叫做单位制.国际单位制(the International System of Units)的简称 SI 来自法语“Le Système International d'Unités”,是由国际计量大会所采用和推荐的一贯单位制.我国法定计量单位是建立在 SI 基础上的计量单位.国际单位制 SI 中有七个独立定义的基本单位,它们分别是

① 长度、距离单位:米(meter),符号用 m 表示.1m 是(1/299 792 458)秒(s)时间间隔内光在真空中所经路径的长度.

② 质量单位:千克(kilogram),符号用 kg 表示.1kg 等于国际千克原器的质量.

③ 时间单位:秒(second),符号用 s 表示.1s 是 ^{133}Cs (铯)原子基态的两个超精细结构能级之间跃迁所对应的辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间.

④ 电流强度单位:安[培](Ampère),符号用 A 表示.其定义为在真空中截面面积可以忽略的相距 1m 的平行直导线内通过等量恒定电流时,若该电流使导线间每米长度上产生的相互作用力为 $2 \times 10^{-7}\text{N}$,则这个恒定电流的电流强度为 1A.

⑤ 热力学温度单位:开尔文(Kelvin),符号用 K 表示.1K 是水三相点热力学温度的 1/273.16.

⑥ 物质的量单位:摩尔(mole),用符号 mol 表示.1mol 是一系统的物质的量,

该系统所包含的基本单元数与 0.012kg 的碳-12 的原子数目相同. 基本单元可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子,或是这些粒子的特定组合.

⑦ 发光强度单位:坎德拉(candela),符号用 cd 表示. 1cd 是一光源在给定方向上的发光强度,该光源发出频率为 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 的单色辐射,且在此方向上的辐射强度为 $(1/683)\text{W/sr}$ (瓦/球面度).

这 7 个基本单位所对应的物理量叫做基本量,由基本量导出的单位称为导出单位.有些导出单位还有专门名称和特有符号,如频率的单位赫兹(Hz)、力的单位牛顿(N)、压力压强的单位帕斯卡(Pa)、电压的单位伏特(V)、能量的单位焦耳(J)、功率的单位瓦特(W)、电量的单位库仑(C)、电容的单位法拉(F)等共 23 个.

二、直接测量量和间接测量量

如果被测物理量与作为测量标准的量可以直接进行比较得出结果,或者可以用预先按标准校对好的量具或仪表进行测量,相应的物理量称为直接测量量.如用米尺测量金属棒的长度,用计时器测量滑块通过光电门所用的时间,用电压表测量某一段电路两端的电压等.

但是对于大多数物理量来说,没有直接读数用的仪表,只能用间接的方法进行测量.例如测量铝圆柱体的密度时,可以用游标卡尺量出它的直径 d 和高 h ,用天平称出它的质量 m ,根据密度的定义式

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}$$

计算出来.像这样测量量是由 n 个直接测量量再经过物理公式计算得出的,这样的测量称为间接测量,相应的物理量称为间接测量量.

三、等精度测量和不等精度测量

为了减小测量误差,往往对某一物理量进行多次重复测量,如果每次测量的条件都相同(同一观察者,同一套仪器,同一种测量方法,同样的温度、湿度等环境),那就没有任何依据判断某一次的测量一定比另一次更准确.所以每次测量的精度只能认为是具有相同级别的,这种重复测量称为等精度测量.多次重复测量中,只要有一个条件发生了变化,如更换了所用的量具和仪表,或改变了测量方法等,这种重复测量称为不等精度测量.一般在进行多次重复测量时,尽量采用等精度测量.

四、测量误差

物理实验中要对一些物理量进行测量.在一定条件下,任何一个物理量的大小都是客观存在的,都有一个不以人的意志为转移的客观量值,称为真值.真值是一个比较理想的概念,只有通过完善的测量才有可能获得,一般来说不能确切知道这个值.因为任何测量值都是依据一定的理论和方法,在一定的环境下,由一定的人员,使用一定的仪器得到的.因为测量仪器只能准确到一定程度,实验环境和条件不稳定,观测者的操作和读数不能十分准确,理论也有近似性,使测量值与待测量的真值之间总存在差异.如果某物理量的测量值为 x ,真值为 a ,定义测得值减去真值的差为测得值的误差 ϵ ,即

$$\epsilon = x - a \quad (1)$$

误差 ϵ 是一个代数值,当 $x \geq a$ 时, $\epsilon \geq 0$; 当 $x < a$ 时, $\epsilon < 0$.

式(1)定义的测量误差反映了测量值偏离真值的大小和方向,因此又称 ϵ 为绝对误差.绝对误差可以表示某一测量结果的好坏,但在比较不同测量结果时则不太方便.

绝对误差与真值之比 $\frac{\epsilon}{a}$ 叫做相对误差.相对误差常用百分数的形式表示,即

$$E = \frac{\epsilon}{a} \times 100\% \quad (2)$$

相对误差表示误差对测量结果影响的严重程度,因为它不仅考虑到测量值偏离真值的大小和方向,还考虑到了测量值本身的大小,所以它能全面评价测量的优劣.例如测量 20.0V 的电压,绝对误差为 0.02V,则相对误差为 0.1%;而测量 1.00V 电压时,绝对误差仍为 0.02V,则其相对误差为 2%;两者绝对误差相同,但是测量值相差 20 倍,因而相对误差也就差了 20 倍.

五、误差的分类

1. 系统误差(systematic error)

在同一条件下(指实验方法、仪器、实验环境、实验者),对同一物理量进行多次测量时,误差的符号和绝对值均保持不变或按某种规律变化,该类误差称为系统误差.其产生的原因主要有以下几个方面:

(1) 理论(方法)误差

由于测量所依据的理论的近似性,或是实验方法不完善所导致的误差.如单摆的振动周期公式 $T = 2\pi \sqrt{l/g}$,如果摆角 $\theta_m > 5^\circ$,其公式就应改为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta_m}{2} + \dots \right)$$

如用 $T = 2\pi \sqrt{l/g}$ 就会存在理论误差.

又如伏安法测电阻的实验中,采用电流表内接法时,测出的电流是流过待测电阻的电流,但测出的电压是待测电阻与电流表上的总电压(图 1);而采用电流表的外接法时,测出的电压是待测电阻两端的电压,但测出的电流则是流过待测电阻和电压表两者的电流之和(图 2). 因而不不管是采用电流表的内接法还是外接法,都存在方法误差.

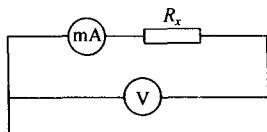


图 1 电流表内接法

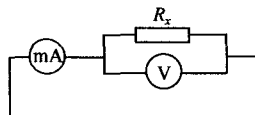


图 2 电流表外接法

(2) 仪器误差

由于仪器本身的缺陷或是没有按规定的条件使用仪器而造成的误差. 例如使用电压表测量某一电压时,如果电压表制作上有缺陷,读出的电压值可能总会比实际值偏小一点. 又如分光计的圆形刻度盘中心与仪器转轴中心不重合造成的偏心差.

(3) 环境误差

由于外界条件(温度、湿度、电磁场、光照等)的影响而产生的误差. 如在热学实验中环境温度随时间升高会给实验造成一定的影响.

(4) 观测误差

由于观察者本人的生理或心理特点造成的. 如用水银温度计测量温度,有的人读数常偏高,有人读数常偏低.

系统误差按测量者掌握的程度可分为“已定系统误差”和“未定系统误差”. 前者是大小和符号都知道的系统误差,后者则是或大小、或符号、或大小与符号都不知道的系统误差,对不能确定其大小和符号的未定系统误差可按随机误差处理.

2. 随机误差(random error)

在同一条件下多次测量同一物理量时,其误差的大小和符号都不确定,而在大量的重复测量中有遵从一定的统计规律(正态分布)的误差称为随机误差,或称之为偶然误差. 随机误差的产生取决于测量过程中一系列随机因素的影响,如仪器性能和测量者感官分辨能力的统计涨落,环境条件的微小的无规则的起伏变化,被测量物自身的不确定性等. 如用最小刻度为 1mm 的米尺去测量某一物体的长度时,

需要用米尺去对准物体的两端并估读到毫米的下一位读数,估读的数值就存在一定的随机性,也就带来了随机误差.随机误差的特点是:绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大;绝对值相等的正负误差出现的概率相同;绝对值很大的误差出现的概率趋于零.因此增加测量次数,可以减小随机误差,但不能完全消除.

3. 过失误差

在实验过程中,除系统误差和随机误差外,还可能出现仪器损坏、由于测量者的操作不当造成的读错读数、记错数据等引起的误差.明显超出规定条件下预期值的误差,是一种人为的过失误差(有时称之为粗大误差),它不属于测量误差,含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值.只要测量者采取严肃认真的态度,过失误差是可以避免的,在数据处理中要尽量剔除坏值.

4. 测量的精密度、准确度和精确度

评价测量结果时,经常用到精密度、准确度和精确度三个概念.

(1) 精密度

表示测量结果中随机误差的大小.如果一组测量数据,互相差异较小,即数据比较集中,我们就说它的精密度高.

(2) 准确度

指测量结果系统误差大小的程度.如果一组测量数据的平均值偏离真值较少,说明测量的准确度高.但是精密度高其准确度不一定高,反过来也一样,准确度高其精密度未必高.

(3) 精确度

是对测量结果中系统误差和随机误差的综合评定.它是指测量结果重复性的好坏及测量结果接近真值的程度.只有测量数据比较集中,而平均值又靠近真值的测量,即测量的随机误差和系统误差都比较小时,测量的精确度才比较高.

图3是以射箭时箭在靶上的分布点为例说明这三个词的含义.(a)表示射箭的精密度高而准确度低,箭射在靶上的位置相互之间很接近,但总体都偏离靶心较远;(b)表示射箭的准确度高而精密度低,整体来看偏离靶心较少,但比较分散;(c)表示射箭的精密度和准确度都比较好,相互偏离较少,又都聚集在靶心附近,即测量的系统误差和随即误差都比较小,精确度高.

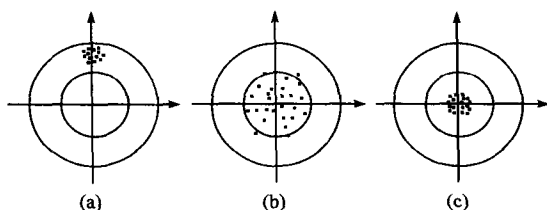


图 3 箭在靶上的分布

第二节 测量结果的评定和不确定度

一、随机误差的估算

随机误差的分布规律和处理方法,涉及较多的概率论和数理统计知识,这里只给出结论,不作论证。

1. 以算术平均值表示测量结果

由于测量误差的存在,被测量的真值是不能被确切地测出的.统计理论可以证明,在条件不变的情况下进行测量时,无限多次重复测量的算术平均值恰好等于被测量的真值.在实际测量中,测量次数总是有限的.因此,我们可以用算术平均值来近似代替真值表示测量结果。

假设对某一物理量测了 n 次,测得值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$,我们称这 n 个值为一测量列,其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

2. 标准偏差

由于算术平均值最接近真值,因此可以用算术平均值参与对标准误差的估算.常用贝塞尔公式去估算标准误差。

$$S_x = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

它的意义表示某次测量值的随机误差在 $(-\sigma_x, +\sigma_x)$ 之间的概率为 68.3%。

3. 不确定度的含义

误差是一个理想概念,它本身就是不确定的.根据误差的定义,由于真值一般不可能准确地知道,因而测量误差也不可能确切获得.对于已定系统误差,应该把它从实验结果中扣除,不需要表达出来.

不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量量不能肯定的程度,是表征被测量的真值所处的量值范围的评定.不确定度反映了可能存在的误差分布范围,即随机误差分量和未定系统误差的联合分布范围.不确定度小,测量结果的可信赖程度高;不确定度大,测量结果的可信赖程度低.不确定度和误差是两个不同的概念,误差是指测量值与真值之差,一般情况下,它是未知的、确定的、可正可负的量;不确定度是表示误差可能存在的范围,不确定度总是正值.它的大小是按照一定的方法计算(或估计)出来,不确定度大,误差的绝对值不一定大.

第三节 直接测量量的不确定度计算

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, A 类不确定度 u_A 是由测量列统计方法分析评定的, B 类不确定度 u_B 不按统计方法分析评定. 两类分量通常用方和根合成的方法得出总不确定度 u , 即

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

1. A 类不确定度

A 类不确定度是指可以采用统计方法计算的不确定度. 根据随机误差的理论, 我们用算术平均值代表多次测量的最佳值:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

式中 n 为测量次数, x_i 为第 i 次测量值. 任一测量值的标准偏差可由贝塞尔公式近似地给出

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

用统计方法可以求出平均值的标准偏差, A 类标准不确定度可以直接用平均值的标准偏差表示, 即

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$