

21世纪高等院校规划教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主编 崔杰军

 郑州大学出版社

21世纪高等院校规划教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主编 崔杰军



郑州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/崔杰军主编. —郑州:郑州大学出版社,
2008.4

ISBN 978 - 7 - 81106 - 794 - 1

I. 大… II. 崔… 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 (2008) 第 025323 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:邓世平

全国新华书店经销

郑州文华印务有限公司印制

开本:787 mm × 1092 mm

印张:14.25

字数:328 千字

版次:2008 年 4 月第 1 版

邮政编码:450052

发行部电话:0371 - 66966070

1/16

印次:2008 年 4 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978 - 7 - 81106 - 794 - 1

定价:22.60 元

本书如有印装质量问题,请向本社调换

编者名单

主 编 崔杰军

编 委 于洛生 王世建 刘 昆 杨培霞

李 瑞 欧海峰 罗艳伟 符建华

程仁志 富笑男 蔡根旺 樊志琴

前言

QIANYAN

本书依据国家教委关于高等院校的物理实验教学基本要求,借鉴原郑州粮食学院与郑州工业高等专科学校十余年来实验讲义的精华和特色,根据我校目前物理实验教学发展的现状,汲取众多物理教师多年积累的实验教学经验,集思广益而成.本书不仅是我校物理实验教学工作不断发展、改革的一个总结,而且是深化实验教学改革思路的探索.本书主要适用于高等工程类本科与专科专业的物理实验教学。

为了 21 世纪的需要,本书力图形成自己的特色。其一,本书编写的指导思想是努力实现工程技术复合型工程思维能力的构建,努力实现本门课程由知识教育向素质教育的转化,因此,本书内容结构合理,且具有时代性;其二,本书的教学内容减少了一些验证性实验,在编写上体现了理论与实践相结合的原则,增加了综合性、技术性和设计性实验的比重,体现了动手能力与动脑能力相结合的实验教学改革思路;其三,本书注重物理实验方法、实验设计思维在实验教学内容中的渗透,加强了对学生思维能力与创新能力的培养。

物理实验作为一门科学,包括了实验理论、实验设计、实验方法、实验条件、仪器装置、操作测量、数据处理、结果分析等诸多方面,每一方面都有自身的规律和丰富的内容。本书作为一本教材,虽然不能面面俱到,但仍有较广泛的涉及。我们希望各位物理实验教师在使用本书时积极挖掘上述诸多方面的教学内容,帮助我们使本书在今后更为完善。

本书包括物理实验基础知识、测量误差及数据处理、基础性实验 7 个、提高与综合性实验 17 个(其中实验 24 的周期信号波形傅立叶分析实验包括四个实验内容)、技术性实验 4 个(其中实验 28 的传感器系列实验包括十个实验内

容)、设计性实验6个。通过这样的编排,学生能观察到更多的物理现象,认识其科学规律,学习到更多的实验和测量方法,掌握更多基本仪器的使用调节方法,并能够运用实验理论去分析处理实验数据,得到一个科学的实验结果。

崔杰军编写了第一章和实验25~26;符建华和杨培霞编写了实验1~8;蔡根旺、罗艳伟和李瑞编写了实验9~19;樊志琴编写了实验20、21、22、28;王世建和于洛生编写了实验23、24、27、29、30、31、32、33、34;欧海峰、刘昆和程仁志修定了附录内容,并对一些内容参加了编写。全书由崔杰军和富笑男统稿。

本书难免有疏漏之处,敬请指正。

编者

2008年2月

目录

MULU

第一章 绪论与数据处理基础知识	1
1.1 绪论	1
1.2 数据处理基础知识	4
第二章 基础实验	21
实验1 规则物体密度的测量	21
实验2 液体表面张力系数的测定	26
实验3 电学仪器与基本电路	31
实验4 电表的改装与校准	41
实验5 万用电表的使用	46
实验6 示波器的认识及应用	48
实验7 分光计的调整与使用	55
第三章 提高与综合性实验	63
实验8 用拉伸法测定金属材料的杨氏弹性模量	63
实验9 刚体转动惯量的测定	67
实验10 声速的测量	71
实验11 电桥	77
实验12 电位差计	83
实验13 用霍尔元件测量磁场	87
实验14 霍尔效应的研究	91
实验15 等厚干涉及其应用	96
实验16 用分光计测三棱镜的折射率	100
实验17 光栅衍射的观测	103
实验18 迈克尔逊干涉实验	107
实验19 光全息照相	112
实验20 光电效应及普朗克常数测定	119

实验 21	夫兰克 - 赫兹实验	123
实验 22	密立根油滴实验	130
实验 23	混沌现象研究	141
实验 24	周期信号波形傅里叶分析实验	144
实验一	BPF 带通滤波器幅频特性的研究	144
实验二	周期电信号的分解与合成	147
实验三	非正弦周期信号的傅里叶级数合成	150
实验四	RLC 串联谐振电路选频特性与信号的分解	152
第四章	技术性实验	155
实验 25	硅光电池特性研究	155
实验 26	光纤音频信号传输技术实验	162
实验 27	液晶电光效应	170
实验 28	传感器系列实验	180
实验一	金属箔式应变片——单臂电桥性能实验	180
实验二	金属箔式应变片——半桥性能实验	183
实验三	金属箔式应变片——全桥性能实验	184
实验四	直流全桥的应用——电子秤实验	185
实验五	差动变压器的性能测定	186
实验六	差动变压器零点残余电压测定及补偿	188
实验七	激励频率对差动变压器特性的影响	189
实验八	电容式传感器的位移特性实验	191
实验九	直流激励时霍尔传感器位移特性实验	192
实验十	集成温度传感器的特性	194
第五章	设计性实验	196
实验 29	用浮力法测密度	196
实验 30	组装热敏电阻测温电桥	197
实验 31	组装 PN 结数字电桥	198
实验 32	自组电位差计测电池电动势	200
实验 33	劈尖干涉测水中光速与薄膜厚度	201
实验 34	用板式电桥测电阻	202
总附录表		203

第一章 绪论与数据处理基础知识

1.1 绪 论

一、物理实验课的地位和任务

物理学从本质上说是一门实验科学。物理规律的发现、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,杨氏干涉实验使光的波动学说得以确立,赫兹电磁波实验使麦克斯韦的电磁场理论获得普遍承认,等等。当然,一些实验问题的提出,以及实验的设计、分析和概括等也必须应用已有的理论作为依据。总之,历史表明,物理学的发展是在实验和理论两方面相互推动和密切结合下进行的。

我们在学习物理学时,要正确处理好理论课与实验课的关系。高等工科院校的物理实验课是一门独立设置的重要基础课,物理实验本身有它自己的一套实验理论、实验方法和实验技能。物理实验课内容丰富而广泛,不少实验在物理学发展史上起过非常重要的作用,是由实验总结出理论或由实验验证理论的典范;同时,由于物理实验本身的性质和特点决定了它对其他实验领域的基础作用。

物理实验课教学,按照循序渐进的原则,通过学习物理实验知识、方法和技能,使学生了解科学实验的基本过程和方法,为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。

物理实验课教学的具体任务是:

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

(2)培养学生的科学实验能力,能够自行阅读实验教材或资料,做好实验前的准备工作;能够运用物理学的基本理论对实验现象进行初步分析和判断;能够正确记录和处理实验数据、绘制图线,说明实验结果,并撰写合格的实验报告;能够完成简单的设计性实验。

(3)培养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、严肃认真的工作态度、主动研究探索的创新精神,并培养学生遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德。

二、物理实验课的基本程序

本书所包括的物理实验,多数是测定某一物理量的数值,也有一些是研究某一物理量随另一物理量变化规律的,对于同一物理量,虽然可用不同方法来测定,但是,无论实

验的内容如何,也无论采用哪一种实验方法,物理实验课的基本程序大都相同,一般可以分为以下三个环节:

(1)实验前的预习。因实验课的时间有限,故熟悉仪器和测量数据的任务一般都比较重,不允许在实验课内才开始研究实验的原理。如不了解实验原理,实验时就不不知道要研究什么问题,要测量哪些物理量,也不了解将会出现什么现象,只是机械地按照教材所定的步骤进行操作,离开了教材就不晓得怎样动手。用这种方式去做实验,又有什么意义呢?虽然也得到了实验数据,却不了解它的物理意义,也不会根据所测数据去推求实验的最后结果,这岂不是自欺欺人?因此,为了在规定的时间内,高质量地完成实验课的教学任务,学生应当做好实验前的预习,并写出预习报告(即实验报告的前几部分)。

预习的要求,应以理解本书所叙述的原理为主,对于实验的具体过程只要求粗略地了解,以便能抓住实验的关键,在实验中较好地控制实验的物理过程或物理现象,及时、迅速、准确地获得待测物理量的数据。

(2)进行实验。动手实验前要熟悉仪器,了解仪器的工作原理和使用方法。然后将仪器安装调整好。例如,调节气垫导轨达到水平,调整自由落体仪跟地平面垂直,调节光具座上各光学元件处于同轴等高,等等。

每次测量后,应立即将数据记录在实验笔记本上。要根据仪表的最小刻度单位或准确度等级决定实验数据的有效数字位数。各个数据之间、数据与图表之间不要太挤,应留有间隙,以供必要时补充或更正。若觉得测量的数据有错误,则可在错误的数字上画一条整齐的直线;若整段数据都测错了,则划一个与此段大小相适应的“×”号。在情况允许时,可以简单地说明为什么是错误的。错误记录的数据不要用黑圆圈或黑方块涂掉。我们要保留“错误”数据,不毁掉它,是因为“错误”数据有时经过比较后竟是对的。当实验结果与温度、湿度和气压有关系时,要记下实验进行时的室温、空气湿度和大气压。

总之,测量实验数据时要特别仔细,以保证读数准确。因为实验数据的优劣,往往决定了实验工作结果的成败,未经重复测量时,不允许修改原始实验数据。

(3)撰写实验报告。实验报告是实验工作的全面总结,要用简明的形式将实验结果完整而又真实地表达出来。写报告时,要求文字通顺、字迹端正、图表规矩、结果正确、讨论认真。应养成实验完成后尽早将实验报告写出来的习惯,因为这样做可以收到事半功倍的效果。

完整的实验报告,通常包括实验名称、实验目的、实验原理、仪器设备、测量数据、数据处理(包括计算、作图、误差分析、实验结果表达等)、讨论等部分,前面几部分的写法并不困难,这里无庸赘述。现仅数据处理中的一些问题略加说明。

误差分析包括两方面的内容:一是确定实验结果的误差范围(不确定度)。因为在精确测量中判定实验结果的不确定范围跟获得实验结果同等重要;二是找出影响实验结果的主要因素,从而采取相应的措施(例如,合理选择仪器,实现最有利的测量条件等)以减小误差。显然,对于不同的实验,因所用的实验方法或所测量的物理量不同,误差分析的方式亦不尽相同。误差过大时,应分析原因,对误差作出实事求是的解释。

在表达实验结果时,一般包括不可分割的三部分,即结果的测量值 $\bar{A}$ 、绝对误差 ΔA 和相对误差 E_r ,综合起来可写为

$$A = (\bar{A} \pm \Delta A) \text{ 单位}, \quad E_r = \frac{\Delta A}{\bar{A}} \times 100\%$$

如果实验是观察某一物理现象或验证某一物理定律,则需要扼要地写出实验的结论。

在最后的讨论中,包括回答实验的思考题、实验过程中观察到的异常现象及其可能的解释、对于实验仪器装置和实验方法的选择等,还可以谈实验的心得体会,但不要求每个实验都必须写心得体会,有则写,无则不要勉强写。

三、如何学好物理实验课

实验课与理论课不同,在实验课堂上,除了教师必要的讲解,大部分时间是学生自己在工作(调整仪器,使用仪器进行观察测量等)。但对于低年级的学生,其独立工作能力比较差,这也正是需要大力培养的。当然,教师对学生给予启发式的辅导或引导是非常必要的,但对于学生来说,也必须做到以下几点:

(1) 思想重视。要充分认识到物理实验课的重要性,克服重理论轻实验的思想。

(2) 目的明确。必须充分明确实验的目的和要求,并紧紧把握住目的与要求,以指导整个实验过程。

(3) 手脑并用。动手操作是实验课的主要特点,但一定要反对盲目动手和试试看的做法。比如要对某个仪器进行调整,先要根据实验需要,考虑如何对该仪器进行调整?可能出现什么问题?总之,要学会动脑子考虑实验中的问题,并以此指导操作,以增强独立思考、独立工作的能力。

(4) 严肃认真。要认真对待实验中的每一个环节、每一个数据的测量;要有条有理地、一丝不苟地、实事求是地对待测量和数据记录;要做到在做第一百次重复测量时仍像第一次测量时那样认真负责。

(5) 互相协作。两人或两人以上共同做一个实验时,一定要彼此配合,轮流操作,人人动手动脑,共同得到锻炼。要克服一人做、其他人看的消极作风。

通过实验课不仅要学到书本上所要求的各种实验的知识和技能,更重要的是培养学生勤于动脑,善于分析、善于解决实验中问题的独立工作能力,要把所学和掌握的知识转化为能力,从而在祖国的建设事业中进行创造性的工作。

四、实验报告内容

实验报告内容包括:

(1) 实验名称、实验者姓名、学号、实验日期等。

(2) 实验目的。

(3) 实验仪器。

(4) 实验原理。用自己的语言对实验所依据的理论作简要叙述,不要照抄书本,并附有必要的公式和原理图(包括电路图或光路图)。

以上 4 项内容要求在课前写在实验报告上。

(5) 实验内容。概括地、条理分明地说明实验所进行的主要程序,观察了哪些物理现象,测量了哪些物理量,并说明这些观测中所采用的方法。

(6) 数据记录与处理。将原始记录数据记录在原始数据记录纸上,教师还要检查并签字,再整理后才能填入报告表格中,该列表的要列表,该作图的要作图。计算按照有效数字的运算法则进行,推导误差公式并计算误差,并按要求格式写出结果表达式。

(7) 结果及讨论。该部分要明确给出实验结果,并对结果进行讨论(如实验中观察到的现象分析、误差来源分析、实验中存在的问题讨论、回答实验思考题等)。也可对实验本身的设计思想、实验仪器的改进等提出建设性意见。

五、学生实验制度

为了培养学生良好的实验素质和严谨的科学态度,保证实验顺利进行和进一步提高教学质量,特制定以下实验制度:

(1) 凡参加物理实验的学生,实验前必须认真预习,写出预习报告,经教师检查同意后方可进行实验。

(2) 上课时不准迟到,不准无故缺课。无正当理由迟到 15 分钟者实验要扣分;超过半小时者教师有权取消其本次实验资格;无故缺课者本次实验记零分。

(3) 必须严格按照实验要求和仪器操作规程,积极认真地进行实验,并做好相关实验记录。

(4) 爱护仪器设备,不得随意从他组乱拿仪器,不准擅自拆卸仪器;仪器发生故障应立即报告,不得自行处理;仪器如有损坏,照章赔偿。

(5) 室内严禁吸烟、吐痰、大声喧哗和乱扔纸屑。

(6) 做完实验后,学生应将仪器整理还原,将桌面和凳子收拾整齐,经教师审查测量记录并签字后,方可离开实验室。每个班都要分组轮流值日打扫卫生,保持实验室整洁。

(7) 实验报告应在实验后一周内交给老师。

1.2 数据处理基础知识

一、测量与误差

(一) 测量

1. 测量的概念

在物理实验中,一切物理量都是通过测量得到的。所谓测量,就是用一定的仪器

(或工具),通过一定的方法,直接或间接地与被测对象进行比较,以确定被测量的量的数值大小。物理测量的内容很多,大到日、月、星辰以至茫茫宇宙,小到分子、原子以至诸多基本粒子。现代人类能够观察和测量的范围,在空间方面:大到百亿光年,小至 $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{cm}$,二者相差 10^{40} 倍以上;在时间方面:长到百亿年,短至 $10^{-23} \sim 10^{-24}$ 秒,二者相差也在 10^{40} 倍以上;在质量、电流、电压、光度等许多方面的测量精度也已达到很高的水平。在促进理论发展、验证理论等方面,需要进行大量的测量工作。只有进行认真的测量,才便于对物理规律进行定量研究,所以,测量工作是科学实验极为重要的内容。正如著名物理学家伽利略所说:“凡是可能测量的,都要进行测量,并且要把目前无法度量的东西变成可以测量的。”

2. 测量的分类

进行物理量测量的形式和方法各有不同。

凡是用仪器可以直接测量出结果的测量,叫做直接测量。如用米尺测长度、天平称质量、秒表记时间、温度计测温度、电流表测电流等,都是直接测量。凡是不能从所使用的仪器上直接读出大小而需要测出一些与待测量有关的量,再由它们之间的函数关系而求出待测量的叫做间接测量。如用单摆法测量重力加速度、用伏安法测量电阻、光栅法测量光波波长等,都是间接测量。

凡是在测量过程中保持相同条件(如仪器精度、环境条件等)的所有测量叫做等精度测量,反之,在不同条件下对某物理量进行的测量,叫做非等精度测量。对此二者,在计算该量的平均值时所用的方法是不同的。前者可直接计算其算术平均值,而后者则要用加权平均的方法计算其平均值。

测量结果的好坏,不仅与仪器有关,而且还与实验环境条件以及实验者的技能素质有关。

本课程的实验中所进行的测量一般都是基础性的测量,所用仪器多是各种基本仪器,实验方法和技能也都是很基本的,但必须引起足够重视,事实上正因为是基本的,所以是非常重要的,它是今后学习和掌握高、精、尖技术的基础,如果没有这个牢固的基础就不可能有将来高水平的发展。

(二)误差

1. 误差的概念

当我们对某一物理量进行测量时,由于受到仪器、测量方法、人的感觉器官及其周围环境的限制,测量是不能无限精确的,测量值与客观存在的真值之间总有一定的差异,测量值只能是真值的近似值,所以一般的测量都存在误差,我们把真值与测量值之差叫做测量误差。

如一物理量的真值为 N_0 ,测得值为 N ,则测量误差 ΔN 为

$$\Delta N = N - N_0 \quad (0-1)$$

由于真值 N_0 是未知的,所以误差 ΔN 也求不出来,必须引入一个新的名词“偏差”,即

$$\text{偏差} = \text{测量值} - \text{平均值} \quad (0-2)$$

这是因为每次测量的偏差很容易测量出来,理论可以证明测量次数越多,平均值越

接近真值。当仪器没有系统误差时,测量次数为无穷多次,这时平均值趋近于真值,所以通常人们把平均值叫做最近真值,习惯把偏差叫做误差。

要特别提醒注意的是误差存在于一切测量之中,而且贯穿测量过程的始终,测量误差的大小反映我们的测量接近于客观真实值的程度。我们的任务是在给定的条件下,尽量减小测量误差,提高测量精度。

2. 误差的分类

误差的产生有多方面的原因,从其性质和来源上可分为“系统误差”与“偶然误差”两大类。

(1) 系统误差。系统误差的特点是,在相同的实验条件下,对同一物理量进行多次测量时,误差的大小和正负总保持不变,或按一定规律变化,这样的误差叫系统误差。例如,千分尺零点的正负、电表的接入误差等就是系统误差的典型例子。它的来源主要有以下几方面:

① 仪器误差:仪器设备由于制造不够精良或装置调节不妥而使数据不可能读得很准确。例如,米尺的刻度不均匀、天平的两臂不等、刻度盘的中心不正、砝码的质量不准、测微螺旋尺的螺距不均匀、电表的零点没调准或磁铁失磁,等等。仪器误差的定义是:在正确使用仪器的前提下,测量值与真值可能出现的最大误差。

② 理论或实验方法的误差:由于测量原理本身不够严密或测量方法与理论的要求有出入等产生。例如,在用天平称质量时,没考虑空气浮力的影响,利用周期 $T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$ 公式测量重力加速度 g 时,要求摆线 L 的摆角 θ 很小 ($\theta < 5^\circ$),实验过程中不一定总能得到满足等。

③ 外界条件引起的误差:是指外界环境固定的、单方面的影响或干扰。例如,精密天平受阳光单方面的照射而引起不等臂,液体压强计和气体压强计由于外界温度的影响,都会使测量值产生误差。

④ 个人误差:由于观察者的视觉、听觉等感觉器官的限制,以及观察者本身的不良习惯和缺乏实验训练等原因而产生的误差。例如,在按停表时,有的人习惯于早按,有的人习惯于迟按。在读取仪表的示数时,眼睛没有正对指针刻度,总是从上、下或左、右一方来读数等。

在实验中,系统误差的发现和消除是一个复杂的问题,原则上可以通过改善仪器、改进测量方法,纠正个人的偏差或通过计算等加以改正或修正。

(2) 偶然误差。在测量时,即使采用了没有系统误差的测量过程,或排除了产生系统误差的因素(实际上不可能绝对排除),进行了精心的多次观测,每次测量值还是有差异的。例如用平行光法测凸透镜的焦距,每次判断像的清晰程度,以及在光具座上对准透镜架及光屏所处位置,并读出毫米以下的一位估读值,都有一定的偶然性,都会带来误差,产生这种误差的原因有:

① 由于观察者的感觉器官(视觉、听觉)的限制,以及手脚灵活性的限制等,使得观察结果有时比较大,有时比较小。

② 由于实验条件无规则的起伏和周围环境无规则变化的影响使观察结果时大时

小。例如,温度和气压的起伏、地基的震动、光线的闪动、电磁场的干扰,等等。这些由于偶然的或不确定的因素所造成的每一次测量值的无规则的涨落,称为偶然误差,也称为随机误差。

偶然误差的特点是在相同的实验条件下进行多次测量时,各测量值有的比真值偏大,有的比真值偏小。换句话说,偶然误差无论在数值的大小或符号上都是不固定的,似乎是纯属偶然的。但若测量次数很多,测量结果中也显示出一定的规律性,即服从一定的统计规律,符号相反、大小相等的误差出现的几率是相同的;绝对值小的误差较绝对值大的误差出现的几率大;偶然误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋向于零等。也就是说在数学上偶然误差符合正态分布,其分布曲线如图 0-1。

图中 $f(\Delta x)$ 表示偶然误差出现的概率, Δx 表示误差, σ 表示标准误差, η 表示平均误差。

由于某些偶然误差是人所不能完全控制的偶然因素所引起的,所以不可能通过改善仪器、改进实验方法或修正测量原理等办法来消除,但是可以适当增加测量次数取其平均值来减少偶然误差。

根据偶然误差的性质,有多种处理偶然误差的理论和方法。

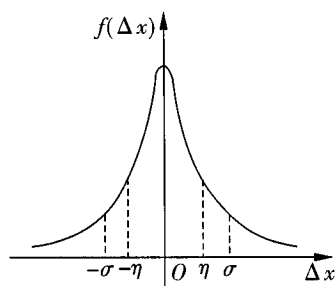


图 0-1 偶然误差分布图

总之,系统误差与偶然误差性质不同,来源不同,处理方法也不同。我们所说的测量精密度高,是指偶然误差小测量准确度高,若系统误差是指准确度高,精确度是把两者都包括进去了,影响测量结果精确度的,有时主要因素是偶然误差,有时主要因素是系统误差,对于某个具体实验,需要进行具体分析,测量结果的总误差是系统误差和偶然误差的总和。

有时候,系统误差和偶然误差要加以区别、分别处理,在精密测量时尤其如此,有时候,只是为了说明总误差的限度,就不需要加以区别。许多不太精密的仪器的最大允许误差(如电表的精度级别)就是既包括系统误差又包括偶然误差。有时候,也难于划分和区别它们。

最后必须指出,“错误”与误差不同,错误完全是人为的。例如,记录数据时将“3.51”记为“35.1”,读数时将“43”看成“48”,演算时将数值算错,以及操作方法不正确等,错误是可以完全避免的,而误差只能设法尽量降低,没办法全部消除。

(三)偶然误差的估算

实验后,为了正确评价和表示实验结果,必须对实验中的误差进行估算,而实验前可以根据对实验精确度的要求,通过误差估算选择恰当的实验方法和仪器。在本课程所涉及的多数实验中,由于选择了恰当的实验方法与相应精度的仪器,实际上使得系统误差大大降低了或者基本消除了,所以我们今后误差的估算主要是偶然误差。

1. 单次直接测量的误差估算

在物理实验中,常常由于条件不许可,或对测量精确度要求不高等原因,对一个物理量的直接测量只进行了一次。这时,可根据实际情况,对测量值的误差进行合理的具体估计,不能一概而论。在一般情况下,对于偶然误差很小的测定值,可按仪器出厂鉴

定书或仪器上直接注明的误差作为单次测量的误差。如果没有注明,可以从后面附录二《常用仪器的仪器误差》中查找分析确定。在某些特殊情况下,一次测量的有效数字位数应根据具体条件加以确定。如在测一较长距离或实验情况不允许正确放置米尺时,测量误差显然会超过仪器的最小分度值,因此,其结果的有效数字位数应按实际测量的情况合理确定。

2. 多次测量的误差估算

(1) 算术平均值。前面说过,由于测量误差的存在,在计算测量中,真值总是不能确切知道,对于某一物理量 N 进行多次测量的结果不会完全一样,那么怎样才能使测量结果最合理地代表真值呢? 常用的办法是,在测量条件相同的情况下,对某物理量 N 进行 n 次测量,其测量值分别为 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$, 则其算术平均值为

$$\bar{N} = \frac{N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{n} \quad (0-3)$$

根据误差的统计理论,在一组 n 次测量的数据中,算术平均值 $\bar{N}$ 最接近于真值,称为测量的最佳值或最近真值。当测量次数无限增加时,算术平均值就将无限接近于真值。

我们在实际测量中,由于测量次数并不能无限增加,真值也就不能确定,误差也只能估算,所以测量值的误差就可用算术平均偏差或均方根偏差(标准偏差)来表示。

(2) 算术平均偏差。设各测量值 N_i 与平均值 $\bar{N}$ 的偏差为 $\Delta N_i (i=1, 2, \dots, n)$, 即

$$\Delta N_1 = N_1 - \bar{N}, \Delta N_2 = N_2 - \bar{N}, \dots, \Delta N_n = N_n - \bar{N}$$

若考虑到最不利的情况,各次偏差即取绝对值,则算术平均偏差

$$\Delta \bar{N} = \frac{1}{n} (|\Delta N_1| + |\Delta N_2| + \dots + |\Delta N_n|) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta N_i| \quad (0-4)$$

(3) 均方根偏差(标准偏差)。把各次测量值 N_i 与平均值 $\bar{N}$ 的偏差仍记为 $\Delta N_i (i=1, 2, \dots, n)$, 再取其平方的平均值然后开方,即称为均方根偏差或标准偏差,即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta N_i)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n}} \quad (0-5)$$

在有限次测量时,标准偏差常用式(0-6)表示和计算

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta N_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n-1}} \quad (0-6)$$

这里算术平均偏差与标准偏差都用来表示偶然误差,它们都表示在一组多次测量的数据中,各个数据之间分散的程度。如果各个数据之间差别较大,那么算术平均偏差和标准偏差也都较大,这说明测量不精密,偶然误差较大。

在上述两种估算偶然误差的方法中,标准误差与偶然误差理论中的高斯误差正态分布函数的关系更为直接,因此,在正式的误差分析和估算中都采用标准偏差来表示偶然误差。但对于初学者来说,主要是树立误差的概念和对实验进行粗略的简明分析,所以可采用算术平均偏差来进行误差分析和估算,这样要简单得多。

严格来讲,误差和偏差是有区别的,但测量次数很多时,多次测量的平均值最近似

于真值,因此,偏差也就很接近误差。这样,我们以后就不区分偏差和误差的细微差别,而用偏差代替误差。

由于偶然误差本身是一个估计值,所以其结果一般只取一位或两位有效数字,为简单起见,我们规定只取一位有效数字。

例:用一般的毫米尺测量某圆柱体的直径5次,其测得值分别为:3.42,3.43,3.44,3.46和3.45cm,求其算术平均值、算术平均误差与标准误差。

解:其算术平均值显然为

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i = \frac{1}{5} (3.42 + 3.43 + 3.44 + 3.46 + 3.45) = 3.44 (\text{cm})$$

其算术平均误差为

$$\Delta \bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |D_i - \bar{D}| = \frac{1}{5} (0.02 + 0.01 + 0 + 0.02 + 0.01) = 0.012 (\text{cm})$$

$\Delta \bar{D}$ 取0.012cm。

其标准误差为

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{1}{4} [(-0.02)^2 + (-0.01)^2 + (0.02)^2 + (0.01)^2]} \\ = 0.0158113 (\text{cm})$$

σ_D 取0.02cm。

测量结果为: $D = \bar{D} \pm \sigma_D = (3.44 \pm 0.02) \text{cm}$,

$$E = \frac{\sigma_D}{\bar{D}} \times 100\% = \frac{0.02}{3.44} \times 100\% = 0.6\%$$

测量结果表示应遵从以下三点要求或规定:

- (1) 绝对误差一般只取一位有效数字,而且用进位法,即见数要进位(隔0不进位);
- (2) 测量结果的末位可四舍五入与绝对误差 ΔN 的位数对齐;
- (3) 相对误差 E 要写成百分数的形式,可取一位或两位有效数字。

3. 测量结果的评价与表达

测量数据经相应处理,通常把测量结果表示为

$$N = \bar{N} \pm \Delta N, \quad E = \frac{\Delta N}{\bar{N}} \times 100\% \quad (0-7)$$

$$\text{或} \quad N = \bar{N} \pm \sigma, \quad E = \frac{\sigma}{\bar{N}} \times 100\% \quad (0-8)$$

这里的 N 是多次测量的算术平均值,也可以是单次测量值, ΔN 是其误差的绝对值,亦称绝对误差, σ 为标准误差。

对误差的不同估算方法,得到的误差范围不同,其含义是什么?又如何理解呢?

由概率统计知识可知,可以希望在 $(\bar{N} \pm \Delta N)$ 区域内包含真值的概率为 57.5%,在 $(\bar{N} \pm \sigma)$ 区域内包含真值的概率为 68.3%;在 $(\bar{N} \pm 3\sigma)$ 区域内包含真值的概率为 99.7%,我们称 $\pm 3\sigma$ 为极限误差,并由此看出,在测量次数不多的情况下,若测量误差