



“十三五”普通高等教育规划教材

DAXUE WULI
SHIYAN JIAOCHENG

大学物理实验教程

主 编 戴雄英 申莉华 赵光强

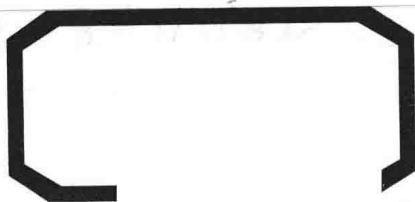
主 审 曾爱华



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十三五”普通高



大学物理实验教程

主 编 戴雄英 申莉华 赵光强
主 审 曾爱华

北京邮电大学出版社
· 北京 ·

内 容 提 要

本书是根据教育部颁布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),并结合物理实验室仪器设备的实际情况,在总结多年教学实践的基础上编写而成。

全书共分为6章,共40个实验.绪论部分主要介绍物理实验的任务、基本程序和要求,并且给出了物理实验成绩评定的参考定分标准,第1章介绍了有效数字、误差理论和数据处理的基本方法等内容,第2章至第6章选编了40个力学、热学、电磁学、光学和近代物理等方面的实验.书末附录介绍了国际单位制,给出了常用的物理参数和常用仪器的性能参数,以便查阅。

本书可作为高等学校各专业物理实验课的教材,也可作为涉及物理学的实验人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/戴雄英,申莉华,赵光强主编.--北京:北京邮电大学出版社,2017.1

ISBN 978-7-5635-4928-3

I. ①大… II. ①戴… ②申… ③赵… 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(2016)第 210873 号

书 名	大学物理实验教程
主 编	戴雄英 申莉华 赵光强
责任编辑	沙一飞
出版发行	北京邮电大学出版社
社 址	北京市海淀区西土城路 10 号(100876)
电话传真	010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
网 址	www3.buptpress.com
电子信箱	ctrd@buptpress.com
经 销	各地新华书店
印 刷	北京泽宇印刷有限公司
开 本	787 mm×1 092 mm 1/16
印 张	19
字 数	485 千字
版 次	2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-4928-3

定价: 42.00 元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

前 言

本书是根据教育部颁发的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),并结合物理实验室仪器设备的实际情况,在总结多年教学实践的基础上编写而成的。

全书分为6章,共40个实验。绪论部分主要介绍了物理实验的特点、物理实验的基本程序和要求,并且给出了物理实验成绩评定的记分标准。第1章较系统地介绍了有效数字、误差理论和数据处理基本方法等内容;第2至第6章共选编了40个有关力学、热学、电磁学、光学和近代物理等方面的实验,书末附录介绍了国际单位制,给出了常用的物理参数、常用仪器的性能参数,以便查阅。

本教材十分注意对学生实际操作能力的训练,各个实验既注重对实验原理的理论分析,又重视对学生的实验技术的指导。实验中还编写了一些思考题,以培养学生独立思考的能力。

本教材由戴雄英、申莉华、赵光强主编,具体参加编写的老师有赵光强、刘艳辉、戴雄英、贺文阳、易国军、肖刚、李玉琮、申莉华、赵云辉、袁琳、栗新华、兰中建、张海瑞、杨国平等,全书最后由戴雄英统稿。曾爱华教授认真审阅了此书,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

实验教学是一项集体的事业,无论实验的编排、实验仪器的安装调试,还是教材的编写,都是实验室全体工作人员的劳动成果。本书编入的实验选题,汇聚了全体工作人员多年的教学经验和体会。本书虽由以上署名的同志执笔编写,但实际上是一项集体操作,它包含着所有曾在物理实验室工作过的同志的贡献。

由于编者水平有限,书中一定还存在缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
第 1 章 测量误差与数据处理	4
§ 1.1 测量	4
§ 1.2 有效数字	4
§ 1.3 误差	9
§ 1.4 数据处理方法	20
习题	30
第 2 章 力学实验	31
实验 1 基本测量	31
1.1 长度测量	31
1.2 物体密度的测量	36
实验 2 杨氏模量的测量	41
2.1 拉伸法测金属丝的杨氏模量	41
2.2 共振法测金属材料的杨氏模量	45
实验 3 空气、液体及固体介质的声速测量	49
实验 4 刚体转动惯量的测量	56
4.1 扭摆法测转动惯量	56
4.2 用三线摆测量刚体的转动惯量	61
实验 5 简谐振动的研究	66
实验 6 动量守恒定律的验证	69
第 3 章 热学实验	73
实验 7 液体黏滞系数的测量	73
7.1 落球法测量液体黏滞系数	73
7.2 落针法测液体黏滞系数	78
实验 8 空气比热容比的测量	82
实验 9 冰溶解热的测量	85
实验 10 稳态平板法测量非良导体的导热系数	89
实验 11 金属丝的线膨胀系数的测量	93
实验 12 PN 结正向压降与温度关系的研究和应用	96
第 4 章 电磁学实验	101
实验 13 电阻的伏安特性研究	101
实验 14 电表的改装与校准	105



实验 15	多用表的使用	109
实验 16	电位差计测电动势	114
实验 17	用惠斯登电桥测电阻	118
实验 18	用稳恒电流场模拟静电场	121
实验 19	霍尔效应	127
19.1	利用霍尔效应测磁场	127
19.2	利用霍尔效应测量霍尔元件的基本参数	132
实验 20	示波器的调整与使用	139
实验 21	电子束实验	153
实验 22	铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线	160
第 5 章	光学实验	171
实验 23	薄凸透镜焦距的测量(测量实验)	171
23.1	用自准法测薄凸透镜焦距	171
23.2	用位移法测薄凸透镜焦距	172
实验 24	分光计的使用实验	175
24.1	分光计测三棱镜顶角	175
24.2	用分光计测折射率	182
24.3	用分光计测光栅常数和波长	184
实验 25	用牛顿环测透镜的曲率半径	188
实验 26	偏振光的研究	192
实验 27	迈克耳孙干涉仪测波长	205
实验 28	全息照相技术	210
实验 29	光速测量	214
第 6 章	近代物理实验	225
实验 30	RLC 电路特性的研究	225
30.1	RLC 电路的稳态特性及谐振现象研究	225
30.2	RLC 电路的暂态过程研究	230
实验 31	非线性电路混沌实验	235
实验 32	弗兰克-赫兹实验	238
实验 33	利用光电效应测量普朗克常数	243
实验 34	光敏电阻特性测量实验	250
实验 35	玻尔共振实验	252
实验 36	密立根油滴实验	259
实验 37	超声光栅实验	265
实验 38	数字万用表设计实验	269
实验 39	太阳能电池基本特性的研究	278
实验 40	磁阻效应实验	282
附录	286

绪 论

一、物理实验课的任务

物理学研究方法通常是在观察和实验的基础上对物理现象进行分析、抽象和概括,建立物理模型,探索物理规律,进而形成物理理论.可见,物理规律是实验事实的总结,而物理理论的正确与否需要实验来验证.

“大学物理”和“物理实验”原来是作为一门课程开设,即物理课程.由于历史的原因,为了纠正重理论、轻实验的偏向,为了加强实验能力训练,在20世纪70年代末,物理实验部分从原来的物理课程中分离出来,独立形成一门课程——物理实验.它与物理理论课是关系密切的两门课程.实验需要理论指导,在实验过程中,通过理论的运用与现象的观测、分析,理论与实验相互补充,以加深和扩大学生对物理知识的理解.

物理实验是理工科大学生进行科学实验训练的一门基础课程,也是素质教育的重要环节.它的主要任务有以下5个方面:

(1)通过实验,学习运用理论指导实验,以及掌握分析和解决问题的科学方法.在学习物理实验的一些典型方法时,尤其要注重学习它的思想方法,以有助于思维与创新能力的培养.

(2)培养良好的实验习惯.正确安排仪器位置,正确操作仪器,耐心细致地观察记录.

(3)提高排除实验故障的能力.实验往往不是一帆风顺的,应学会分析和解决实验中出现的问題,促使自己“手脑配合”,逐步提高实验素质.

(4)培养实事求是的科学作风.实验“小忌”是测量马虎,实验“大忌”是编造数据.多做实验往往会自觉地杜绝上述弊病,因为马虎测量与拼凑数据,不但会受到教师的批评,也会使自己的实验报告漏洞百出.

(5)培养实验的设计技巧.经过一系列实验的实际训练,潜移默化,从中领悟到实验设计的技巧,为以后从事科研工作打下良好的基础.

总之,教学的重点放在培养学生科学实验能力与提高学生科学实验素养方面,使学生在获取知识的自学能力、运用知识的综合分析能力、动手实践能力、设计创新能力及严肃认真的工作作风、实事求是的科学态度方面得到训练与提高.

二、物理实验课的基本环节

实验课与理论课不同,它的特点是学生在教师的指导下自己动手,独立地完成实验任务.通常,每个实验的学习都要经历三个环节.

1. 实验的准备预习

实验前必须认真阅读实验相关内容,做好必要的预习,才能按质按量按时完成实验.同时,预习也是培养自学的一个重要环节.

预习时重点解决以下三个问题:①这个实验最终要得到什么样的结果?②这个实验的理

论依据是什么? ③采用哪些步骤去做这个实验? 最后写出预习报告。

2. 实验的进行

学生进入实验室进行实验, 必须遵守实验规则。首先签到, 然后上交预习报告, 最后再按照签到顺序使用指定仪器。实验过程中, 对观察到的现象和数据要及时进行记录, 实验过程中, 仪器可能会出现故障, 在教师的指导下, 分析故障原因, 学会排除故障。实验时, 要做好实验数据的记录, 实验结束时要将实验数据交教师审阅, 经教师验收签字认可, 再做好仪器设备的整理工作后, 才可离开实验室。

3. 实验总结

实验后, 要及时对实验数据进行处理。数据处理后, 应给出实验结果, 最后写出一份实验报告。

实验报告通常分为以下三部分:

第一部分: 预习报告。

它作为实验报告的前面部分, 要求在正式做实验前写出。内容包括:

- ①实验名称。
- ②实验目的。
- ③实验原理(在理解的基础上, 用简短的文字扼要地阐述实验原理)。

第二部分: 实验记录, 此项内容在实验操作时完成。

内容包括:

- ①实验仪器: 记录主要实验仪器的编号及规格。
- ②实验内容和步骤。
- ③注意事项。
- ④数据记录。

第三部分: 数据处理与总结, 此项内容在实验后进行。

内容包括:

- ①处理数据。
- ②得出结论。
- ③思考与体会: 内容不限, 既可是实验的研究、体会、收获、建议, 也可是解答思考题。

实验报告一律用专用的物理实验报告本书写, 要求字迹清晰, 书写端正, 数据记录整洁, 图表合格, 文理通顺, 内容简明扼要。

三、物理实验成绩评定参考标准

1. 上课准时(6分)

上课准时, 以上课铃声为准。上课准时记6分, 迟到者扣6分。迟到30分钟以上者, 本次实验记不及格。

2. 预习报告(14分)

预习报告包括实验名称(2分), 实验目的(2分), 实验原理(10分)。

3. 实验操作(50分)

①按实验步骤和实验程序, 自觉认真完成实验且实验数据达到要求者, 记满分50分。



②抄袭数据者扣 50 分。

③根据实验步骤的规范程度和实验数据的正确程度酌情记分。

4. 文明卫生纪律(5 分)

①遵守实验规则记 5 分,违者扣 5 分,情节严重者,本次实验记不及格。

②实验完毕后,要打扫室内卫生,不打扫者扣 5 分。

③上实验课闲谈、大声喧哗或不听指导者,扣 5 分。

④上实验课违反纪律、屡教不改或早退者,本次实验成绩不及格。

5. 仪器整理(5 分)

①实验完毕,按要求主动整理好仪器的,记 5 分。

②实验完毕,没有整理仪器的,扣 5 分。

③实验完毕,整理仪器不符合要求者,可视其情况酌情扣分。

6. 实验报告(20 分)

实验报告计分细则:

实验步骤记 5 分,注意事项记 2 分,数据处理记 10 分,体会记 3 分。视实验报告的情况酌情记分。

四、实验守则

为了保证实验正常进行,以及培养严肃认真的工作作风和良好的实验工作习惯,特制定下列规则。

①学生应在约定时间内进行实验,不得无故缺席或迟到。实验时间若要改动,须经实验室同意。

②学生在每次实验前对约定要做的实验应进行预习,并在预习的基础上,作预习报告。

③进入实验室后,应将预习报告放在桌上由教师检查,经过教师检查认为合格后,才可以进行实验。

④实验时,应携带必要的物品,如文具、计算器和草稿纸等。对于需要作图的实验应事先准备毫米方格纸和铅笔。

⑤进入实验室后,根据仪器清单核对自己使用的仪器是否有缺少或损坏。若发现问题,应向教师或实验室管理员提出。未列入清单的仪器,另向管理员借用,实验完毕时归还。

⑥实验前应细心观察仪器构造,操作时应谨慎细心,严格遵守各种仪器仪表的操作规则及注意事项。尤其是电学实验,线路接好后,先经教师或实验室工作人员检查,经许可后才可接通电源,以免发生意外。

⑦实验完毕,应将实验数据交给教师检查,实验合格者,教师予以签字通过。原则上不允许缺课者补做实验,特殊情况由实验指导教师登记,通知学生在规定时间内补做。

⑧实验时,应注意保持实验室整洁、安静。实验完毕,应将仪器、桌椅恢复原状,放置整齐。

⑨如有损坏仪器,应及时报告教师或实验室工作人员,并填写损坏单,说明损坏原因,赔偿办法根据学校规定。

测量误差与数据处理

§ 1.1 测 量

物理实验不仅要定性观察各种物理现象,更重要的是找出有关物理量之间的定量关系.为此就需要进行测量.测量的意义就是将待测的物理量与一个选作计量标准单位的同类量进行比较,得出它们之间的倍数关系.选来作为标准的同类量称之为单位.选作计量单位的标准必须是国际公认的、唯一的、稳定不变的.倍数称为测量数值.由此可见,一个物理量的测量值等于测量数值与单位的乘积.一个物理量的大小是客观存在的,选择不同的单位,相应的测量数值就有所不同.单位愈大,测量数值愈小;反之,愈大.

测量可分为两类.一类是直接测量,把被测量直接与标准量进行比较,直接读数,直接得到数据,这样的测量为直接测量,相应的物理量称为直接测量量.例如,用米尺测长度,用电流表测电流等.另一类是间接测量,是根据直接测量所得到的数据,通过函数关系得到被测量的测量数据,这样的测量为间接测量,相应的物理量为间接测量量.例如直接测量圆管的高度 h , 外径 D 和内径 d , 然后应用公式 $V = \frac{1}{4} \pi h (D^2 - d^2)$, 求得它的体积.在实际测量中,绝大部分是间接测量.

不同的物理量有各自不同的单位,但各物理量不是相互独立,而是由许多物理定义和物理规律联系起来的,所以只需要规定少数几个物理量的单位,其他物理量的单位就可根据定义和物理规律推导出来.独立定义的单位叫作基本单位,相对应的物理量叫作基本量;由基本单位推导出的单位叫作导出单位,相对应的物理量叫作导出量.

在物理学发展过程中,曾建立过各种不同的单位制,各单位制选取的基本量和规定的单位各不相同,使用中常常造成混乱,带来诸多不便.1960年,国际计量大会正式通过了一种通用于一切计量领域的单位制——国际单位制,用符号“SI”表示.SI规定的基本单位有7个.为了保证单位量值的统一,国际计量局设有复现单位标准的专门实验室,每个国家又都有自己的计量组织.任何工厂生产的量具、仪表都要经过计量单位检验鉴定才能出售使用,以保证量具能在规定的准确度标准下体现出量度单位.我国规定以SI单位为国家法定计量单位.

§ 1.2 有效数字

一、有效数字和仪器读数规则

1. 有效数字

实验数据是通过测量得到的.读数的数字有几位,在实验中的含义是明确的.例如,用厘米



分度的尺去测量一铜棒的长度(见图 1-2-1),先看到铜棒的长度大于 4 cm,小于 5 cm,进一步估计其端点超过 4 cm,刻线 3/10 格,得到棒长为 4.3 cm.不同的观察者估读结果不尽相同,可能读成 4.2 cm 或 4.4 cm.这样,同一根棒的长度得到 3 个测量结果,它们都应当是正确的.比较 3 个读数,可以看到最后一位数字测不准确,称之为欠准数字或可疑数字,前面的“4”是可靠数字.

上例中得到的全部可靠数字和欠准数字都是有意义的,总称为有效数字.当被测物理量和测量仪器选定以后,测量值的有效数字的位数就已经确定了.我们用厘米分度的尺测量铜棒的长度,得到的结果为 4.2 cm、4.3 cm 或 4.4 cm 都是 2 位有效数字,它们的测量准确度相同.若换以毫米分度的尺子测量上例中的铜棒(见图 1-2-2),从尺的刻度可以直接读出 4.2 cm,再估读到 1/10 格值,测量铜棒的长度为 4.22 cm(当然,不同的观察者还可能得到 4.21 cm 或 4.23 cm),测量结果有 3 位有效数字,准确度高于上例.

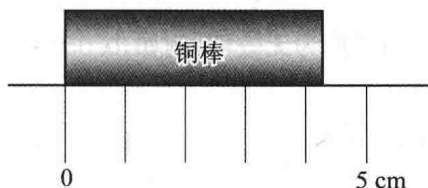


图 1-2-1 用厘米分度尺测量铜棒的长度



图 1-2-2 用毫米分度尺测量铜棒的长度

可见,用不同的量具或仪器测量同一物理量,准确度较高的量具或仪器得到的测量结果有效位数较多.另一方面,如果被测铜棒的长度是十几厘米或几十厘米,那么用厘米分度尺测量的结果变为 3 位有效位数,用毫米分度尺测量的结果变为 4 位有效位.因此,有效位数的多少还与被测量的大小有关.

有效位数的多少,是测量实际的客观反映,不能随意增减测得值的有效位数.

2. 仪器的读数规则

测量就要从仪器上读数,读数应包括仪器指示的全部可靠数字和一位估读出来的数字.

(1) 估读

有一些仪器读数时需要估读,估读时首先根据最小分格的大小、指针的粗细等具体情况确定把最小分格分成几份来估读,通常读到格值的 1/10、1/5 或 1/2. 前述图 1-2-1 就是估读到最小格值的 1/10. 这样的仪器和量具很多,如米尺、螺旋测微计、测微目镜、读数显微镜、指针式电表等. 图 1-2-3 是估读到 1/5 格值的例子. 数字式仪表的最后一位也是可疑数字.

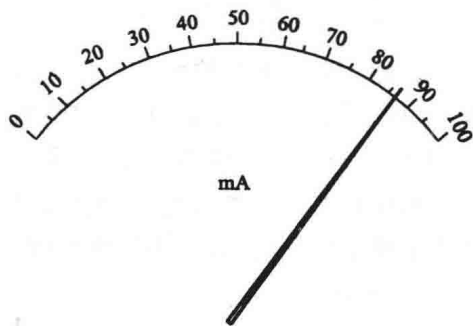


图 1-2-3 估读到 1/5 格值

(2) “对准”时的读数

对于已经选定的仪器,读数读到哪一位是确定的.例如,用 50 分度的游标卡尺测一物体的长度,游标恰与主尺 3 cm 刻线对准,如图 1-2-4 所示. 50 分度游标卡尺的分度值是 0.002 cm,这类仪器不估读,读数应读到厘米的千分位,测得值为 3.000 cm,有效位为 4 位,不可以读成 3 cm. 反过来,如果以为“对准”是准确无误,3 后面的 0 有无穷多个也是错的,因为游标卡尺有一定的准确度,且“对准”也是在一定分辨能力限制下的对准.



图 1-2-4 游标对准主尺 3 cm 刻线

由此可见,在每次测量之前,首先应记录所用仪器刻度的最小分度值,然后根据具体情况确定是否应当估读或估读到几分之一格值,必要时还要加以说明,使记录清楚明白。

3. 有效位的概念

① 数字中无零的情况和数字间有零的情况全部给出的均为有效数。例如,56.147 4 mm 这个量值,其有效数字共有 6 位;50.007 4 mm,其有效数字也有 6 位。

② 小数末尾的零。有小数点时,末尾的零全部为有效数字。例如,50.140 0,其有效位为 6 位。

③ 第 1 位非零数字左边的零。第 1 位非零数字左边的零称为无效零。例如,0.050 470 0,有效位为 6 位;0.000 018 只有 2 位有效数字。

④ 变换单位。变换单位而产生的零都不是有效数字。计量单位的不同选择可改变量值的数值,但绝不应改变数值的有效位数。例如, $4.30 \text{ cm} = 0.043 \text{ 0 m} = 430 \text{ 00 } \mu\text{m} = 0.000 \text{ 043 0 km}$,带有横线的 0 是因为单位变化而出现的,它们只反映小数点的位置,都不是有效数字。上例中的 $43 \text{ 000 } \mu\text{m}$ 还错误地反映了有效位。为了正确表达出有效数字,实验中常采用科学计数法,即用 10 的幂次表示,如

$$4.30 \text{ cm} = 4.30 \times 10^{-2} \text{ m} = 4.30 \times 10^4 \mu\text{m} = 4.30 \times 10^{-5} \text{ km}$$

这种写法不仅简洁明了,特别当数值很大和很小时突出了有效数字,而且还使数值计算和定位变得简单。

二、有效数字的运算规则和修约规则

1. 有效数字的运算规则

从仪器上读出的数值经常要经过运算以得到实验结果,运算中不应因取位过少而丢失有效数字,也不能凭空增加有效位。规范的做法是用测量结果的不确定度来确定测量结果的有效位。看来计算过程中只要不少取位,最后根据不确定度来截取结果的有效位,就不会出错。但也有一些不计算不确定度的情况,例如,用作图法处理数据时。下面给出有效数字的运算规则:如果计算不确定度,则比规则规定再多取 1~2 位,最后再根据不确定度去掉多余的数字。

(1) 加减法运算

和或差的末位数字所在的位置,与参与加减运算各量中末位数字位置最高的一个相同。

$$\text{例 1-2-1} \quad 103.\underline{3} + 13.\underline{561} = 116.\underline{9}$$

$$115.\underline{8} - 1.\underline{652} = 114.\underline{1}$$

(2) 乘除法运算

一般情况下,积或商的有效位数,和参与乘除运算各量中有效位最少的那个数值的位数相同。又建议:如果所得的积或商的首位数字为 1、2 或 3 时,就要多保留一位有效数字。

$$\text{例 1-2-2} \quad 1.\underline{1111} \times 1.\underline{11} = 1.\underline{23}$$

$$85 \text{ 425} \div 125 = 683$$



$$12\,345 \div 98 = 126$$

(3) 对数运算

对数结果的小数点后的位数与真数的有效位数相同。

例 1-2-3 $\lg 543 = 2.735$

(4) 一般函数运算

将函数的自变量末位变化 1, 运算结果产生差异的最高位就是应保留的有效位的最后一位。用这种方法来确定有效位, 是一种有效而直观的方法。

例 1-2-4 $\sin 30^\circ 2' = 0.500\,503\,748$

$$\sin 30^\circ 3' = 0.500\,755\,559$$

两者差异出现在第 4 位上, 故 $\sin 30^\circ 2' = 0.500\,5$ 。

其实这正是求微分问题。通过求微分来确定函数的有效数字取位的意义是: 设测量值的不确定度在最后一位上是 1, 求由此而引起函数的不确定度出现在哪一位上。

例 1-2-5 计算 $\sin 30^\circ 2'$ 。

解 $x = 30^\circ 2'$, $\Delta x = 1' = \frac{\pi}{180 \times 60} = 0.000\,29 \text{ rad}$

$$d(\sin x) = \cos x \cdot \Delta x = 0.000\,25$$

所以有效数末位的位置在小数点后的第 4 位上: $\sin 30^\circ 2' = 0.500\,5$, 它有 4 位有效数字。直观法和微分法效果是一样的。

(5) 运算中常数和自然数的取位规则

运算中无理常数的位数应比参加运算的各分量中有效位最少的多取 1 位, 例如, π 等于 3.141 592 654... 在算式中要将所取的数字全部写出来。自然数是准确的, 例如自然数 2, 它后面有无穷多个 0, 在算式中不必把那些 0 写出来。

上述运算规则是一种粗略的近似规则, 如前所述, 由不确定度决定有效位才是合理的。

2. 修约间隔与修约规则

在例 1-2-4 和例 1-2-5 中, 都从较多的数字中留下了有效数字, 去掉了多余的数字, 这就是对数字的修约。

(1) 修约间隔

修约间隔可以看成是被修约值的最小单元, 它既可以是个数值, 也可以是个量值。修约间隔一旦确定, 修约后的值即应是修约间隔的整数倍。

例如, 修约间隔是 0.1 g, 则修约后的量值只能是 0.1 g 的整数倍而不能出现小于 0.1 g 的部分:

$$712.315 \text{ g 修约成 } 712.3 \text{ g}$$

$$614.470 \text{ g 修约成 } 614.5 \text{ g}$$

例如, 修约间隔是 1 000 m, 则 85.47 km 修约成 85 km 或 $85 \times 10^3 \text{ m}$ 。

(2) 修约中的“进”与“舍”的规则

拟舍弃位小于 5 时, 舍去。拟舍弃位大于 5 (包括等于 5 而其后有非零数值) 时, 进 1, 即保留的末位加 1。拟舍弃位为 5 且其后无数值或皆为零时, 若所保留的末位为奇数, 即进 1; 若为偶数, 则舍去。

例如: 1.234 51 m 修约成 4 位有效位, 为 1.235 m



1.234 49 m 修约成 4 位有效位, 为 1.234 m

1.234 50 m 修约成 4 位有效位, 为 1.234 m

1.233 50 m 修约成 4 位有效位, 为 1.234 m

(3) 负数的修约

取绝对值, 按上述规则修约, 然后再加上负号.

(4) 不允许连续修约

在确定修约间隔后应当一次修约获得结果, 不得逐次修约.

例如, 修约间隔为 1 mm, 对 15.454 6 mm 进行修约.

正确做法: 15.454 6 mm 一次修约为 15 mm;

错误做法: 15.454 6 mm \rightarrow 15.455 mm \rightarrow 15.46 mm \rightarrow 15.5 mm \rightarrow 16 mm.

可见, 错误的做法会导致错误的结果.

数据运算是实验数据处理的一个中间过程. 简算方法和数字取舍规则的采用, 目的是保证测量结果的准确度不致因数字取舍不当而受影响, 同时, 也可避免因保留一些无意义的可疑数字而做无用功, 浪费时间和精力. 这在过去计算工具落后的年代尤为重要. 而现今, 微型计算机的应用已普及, 简算方法和数字取舍规则与过去年代相比, 其重要性已不是那么显著. 也就是说, 计算过程中多取几位数字也并不花费多少精力, 并不带来多少困难. 但是, 实验结果的正确表达仍是值得重视的. 尽管计算器可以给出 8 到 10 位数字的计算结果, 但是, 实验者应该能正确地判别实验结果是几位有效数字, 怎样用标准形式来表示实验结果.

三、测量结果的有效位

1. 测量结果的表示

测量结果通常表示为(请注意, 这不是测量结果的完整报告):

被测量的符号 = (测量结果的值 \pm 不确定度的值) 单位

或

被测量的符号 = 测量结果的值(不确定的值) 单位

2. 不确定度的有效位

不确定度的值通常只取 1 或 2 位有效数字. 本课程的教学为了简化, 规定不论什么情况都取 2 位. 如果表示成相对不确定度的形式, 也取 2 位有效数字.

不确定度计算过程中要多保留一位, 即运算中的数值取 3 位有效数字, 直到算出最终的不确定度, 才修约成 2 位.

3. 测量结果的有效位

国际上规定, 测量结果的修约间隔与其不确定度的修约间隔相等, 即不确定度给到了哪一位, 测量结果也应给出到这一位.

例如, 国际科学协会科学技术数据委员会 1986 年公布:

阿伏伽德罗常数 $N_A = 6.022\ 136\ 7(0.000\ 003\ 6) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$;

更习惯的表示是 $N_A = 6.022\ 136\ 7(36) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

原子质量常数 $m_u = 1.660\ 540\ 2(0.000\ 001\ 0) \times 10^{-27} \text{ kg}$,

或表示为 $m_u = 1.660\ 540\ 2(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$.



在弄不清测量不确定度的大小时,无法确定测量结果给出到哪一位;一旦得到了测量结果的不确定度,给出到哪一位就确定了,测量结果的有效位也就明确了。

§ 1.3 误差

一、误差的基本概念

物理量在客观上有着确定的数值,称为真值.然而在实际测量时,由于实验条件、实验方法和仪器精度等的限制或者不够完善,以及实验人员技术水平的原因,使得测量值与客观上存在的真值之间有一定的差异.测量值 x 与真值 x_T 的差值称为测量误差 δ ,简称误差,即

$$\delta = x - x_T$$

任何测量都不可避免地存在误差,所以,一个完整的测量结果应该包括测量值和误差两个部分.既然测量不能得到真值,那么怎样才能最大限度地减小测量误差并估算出误差的范围呢?要回答这些问题,首先要了解误差产生的原因及其性质.测量误差按其产生的原因与性质可分为系统误差、随机误差和过失误差三大类。

1. 系统误差

系统误差的特点是有规律性的,测量结果都大于真值,或者都小于真值.或在测量条件改变时,误差也按一定规律变化。

系统误差来源有下列几个方面:

①由于测量仪器的不完善、仪器不够精密或安装调整不妥,如刻度不准、零点不对、砝码未经校准、天平臂不等长、应该水平旋转的仪器没有放水平等。

②由于实验理论和实验方法的不完善,所引用的理论与实验条件不符.如在空气中称质量而没有考虑空气浮力的影响;测长度时没有考虑温度使尺长改变;量热时没有考虑热量的散失;测电压时未考虑电压表内阻对电路的影响;标准电池的电动势未作温度修正;等等。

③由于实验者生理或心理特点、缺乏经验等而引入的误差.例如有些人习惯于侧坐斜视读数,眼睛辨色能力较差等,使测量值偏大或偏小。

系统误差的消除或减小是实验技能问题,应尽可能采取各种措施将它降低到最小.例如,将仪器进行校正,改变实验方法或者在计算公式中列入一些修正项以消除某些因素对实验结果的影响,纠正不良实验习惯等。

能否识别和降低系统误差,与实验者的经验和实际知识有密切的关系.学生在学习过程中要逐步积累这方面的感性知识,结合实验的具体情况对系统误差进行分析和讨论。

2. 随机误差(又称偶然误差)

在相同条件下,对同一物理量进行重复多次测量,即使系统误差减小到最低程度之后,测量值仍然会出现一些难以预料和无法控制的起伏,而且测量值误差的绝对值和符号在随机地变化着.这种误差称之为随机误差。

随机误差的特征是其随机性.它的可能来源是,人们的感官(如听觉、视觉、触觉)的分辨能力不尽相同,表现为每个人的估读能力不一致;外界环境的干扰(如温度不均匀、振动、气流、噪



声等)既不能消除,又无法估量;所有影响测量的次要因素不尽全知;等等.这种误差是无法控制的,它服从统计规律.对于某一次测量来说,测量误差的大小和正负是无法预计的.

3. 过失误差(错误)

在测量中还可能出现错误,如读数错误、记录错误、操作错误、估算错误等.错误已不属于正常的测量工作范畴,应当尽量避免.克服错误的方法,除端正工作态度,严格工作方法外,可用和另一次测量结果相比较的办法发现纠正,或者运用异常数据剔除准则来判别因过失而引入的异常数据,并加以剔除.

在下面的讨论中,我们约定系统误差和过失误差已经消除或修正,只剩下随机误差.

二、算术平均值及其误差

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,或测量准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的估算,不能一概而论.在一般情况下,对于偶然误差很小的测量值,可按仪器出厂检定书或仪器上直接注明的仪器误差作为单位测量的误差.如果没有注明,也可取仪器最小刻度的一半作为单位测量的误差.如果测量值的偶然误差较大,则应进行多次测量,然后求其平均值及误差.

2. 多次测量的平均值及误差

为了减小偶然误差,在可能情况下,总是采用多次测量,将各次测量的算术平均值作为测量的结果.如果在相同条件下对某物理量 x 进行了 n 次重复测量,其测量值分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 用 \bar{x} 表示平均值,则

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

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{x} 最接近于真值,称为测量的最佳值或近真值.当测量次数无限增加时,算术平均值就将无限接近于真值^①.

在这种情形下,测量值的误差可用算术平均偏差或均方根偏差(标准偏差)表示出来.

算术平均偏差与均方根偏差都可作为测量值误差的量度,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,其算术平均偏差 Δx 和均方根偏差 σ 也都较大,这说明测量不精密,随机误差较大.

在上述两种偏差的计算方法中,均方根偏差 σ 与随机误差理论中的高斯误差分布函数的关系更为直接和简明,因此在正式的误差分析和计算中都采用均方根偏差作为随机误差大小的量度.这是目前通用的,所以又得到标准偏差的名称.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的分析,因此可采用算术平均偏差来进行误差的分析和运算,这样要简单得多.这里只介绍算术平均偏差,均方根偏差在后面介绍.

(1) 算术平均偏差

设各测量值 x_i 与平均值 \bar{x} 的偏差为 $d_i, i=1, 2, 3, \dots, n$, 即

$$d_1 = x_1 - \bar{x}, d_2 = x_2 - \bar{x}, \dots, d_n = x_n - \bar{x}$$

^① 可参阅冯师颜编《误差理论与实验数据处理》3.4, 科学出版社, 1964.



则算术平均偏差的定义是

$$\begin{aligned}\Delta x &= \frac{1}{n} (|d_1| + |d_2| + |d_3| + \cdots + |d_n|) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i|\end{aligned}$$

严格来讲,误差是测量值与真值之差,而测量值与平均值之差称为偏差,这两者是有差别的。当测量次数很多时,多次测量的平均值 \bar{x} 最接近于真值,因此各次测量值与 \bar{x} 的偏差也就很接近于它们与真值的误差。这样,我们就不去区分偏差与误差的细微区别,分别把标准偏差称为标准误差,把算术平均偏差称为算术平均误差。最后,我们把多次测量值的结果表示为

$$x = \bar{x} \pm \Delta x \quad \text{或} \quad x = \bar{x} \pm \sigma$$

式中 x 为测量值; \bar{x} 是多次测量数据的算术平均值,代表最佳测量值; Δx 为算术平均误差; σ 为标准误差,代表多次测量数据的分散程度; \pm 号表示每次测量值可能比 \bar{x} 大一些,也可能比 \bar{x} 小一些。

(2) 绝对误差与相对误差

上式中的 Δx 或 σ 是以误差的绝对数值来表示测量值的误差,称为绝对误差。但为了评价一个测量结果的优劣,还需要看测量量本身的大小。为此,引入相对误差的概念。

相对误差的定义为

$$E_r = \frac{\Delta x}{x}$$

相对误差也可用百分数来表示,即

$$E_r = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

故又称为百分误差。为了说明相对误差的意义,下面举一个例子。假如测得两个物体的长度为 $l_1 = 23.50 \pm 0.03(\text{cm})$, $l_2 = 2.35 \pm 0.03(\text{cm})$, 则其相对误差分别为

$$E_{r1} = \frac{0.03}{23.50} \times 100\% = 0.13\% \approx 0.2\%$$

$$E_{r2} = \frac{0.03}{2.35} \times 100\% = 1.3\% \approx 2\%$$

从绝对误差来看,两者相等;但从相对误差来看,后者比前者大 10 倍。很明显,第一个测量要准确些。

三、随机误差的高斯分布与标准误差

随机性是随机误差的特点。也就是说,在相同条件下,对同一物理量进行多次重复测量,每次测量值的误差时大时小,对某一次测量值来说,其误差的大小与正负都无法预先知道,纯属偶然。但是,如果测量次数相当多的话,随机误差的出现仍服从一定的统计规律。根据实验情况的不同,随机误差出现的分布规律有高斯分布(又称正态分布)、 t 分布、均匀分布及反正弦分布等。按照教学要求,这里仅简要地介绍随机误差的高斯分布。

1. 高斯分布的特征与数学表述

遵从高斯分布规律的随机误差具有下列四大特征:

①单峰性——绝对值小的误差出现的可能性(概率)大,大误差出现的可能性小。