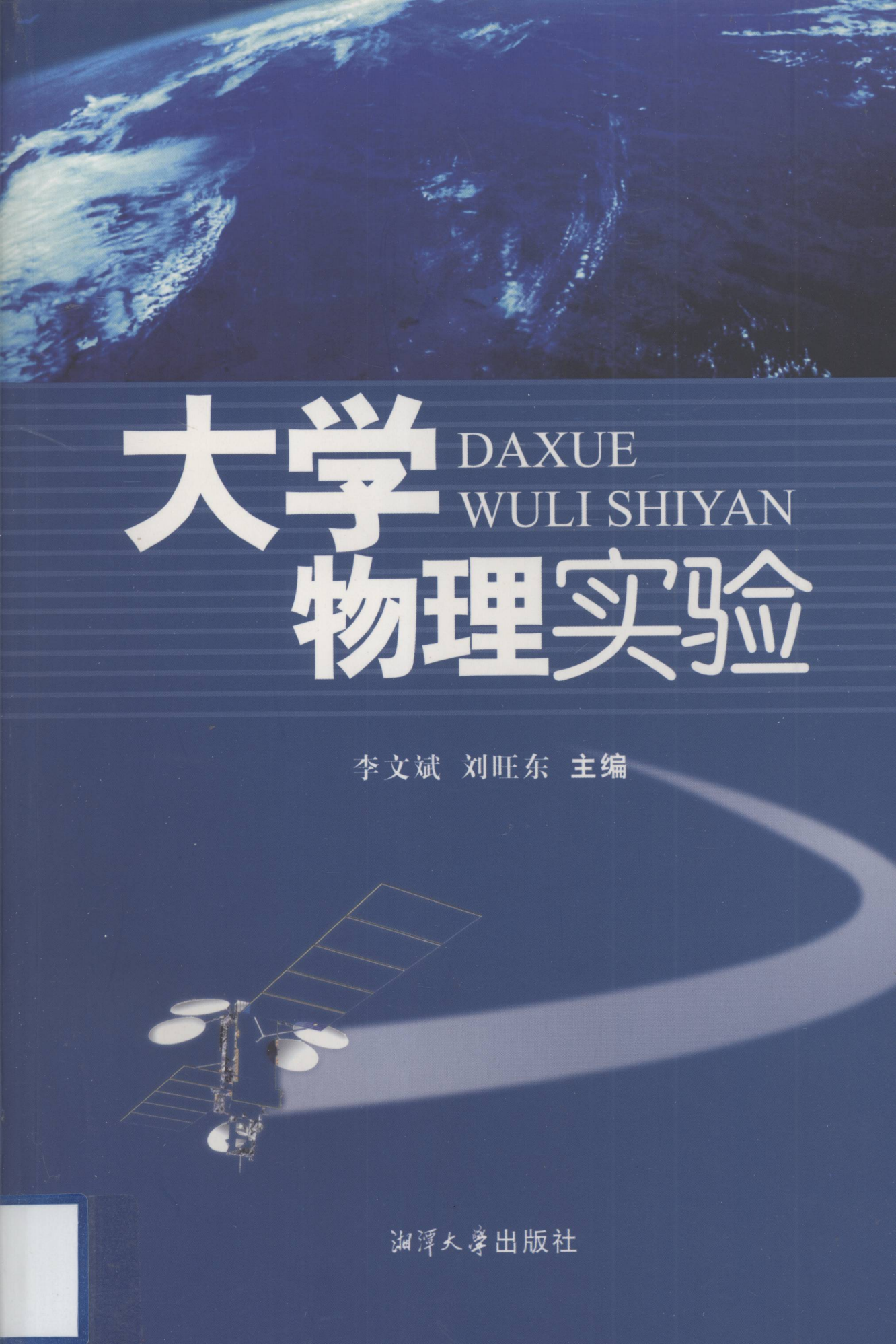


The background of the cover features a satellite in orbit over the Earth. The satellite is positioned in the lower-left quadrant, with its solar panels and antennas visible. A bright, curved light trail from the satellite sweeps across the lower half of the cover. The top of the cover shows a view of the Earth's surface from space, with blue oceans and white clouds.

大学 DAXUE 物理实验 WULI SHIYAN

李文斌 刘旺东 主编

湘潭大学出版社

大学 DAXUE 物理实验 WULI SHIYAN

主 编：李文斌 刘旺东
副 主 编：熊文元
参编人员：黄 锋 何雄辉 傅晓玲
 眭聿文 谭从兵 张丽萍
 周达林 蔡 静 吴松安

湘潭大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 李文斌, 刘旺东主编. —湘潭: 湘潭大学出版社, 2010.1

ISBN 978-7-81128-157-6

I. 大… II. ①李…②刘… 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 (2009) 第 233784 号

大学物理实验

李文斌 刘旺东 主编

责任编辑: 罗 联

封面设计: 罗志义

出版发行: 湘潭大学出版社

社 址: 湖南省湘潭市 湘潭大学出版大楼

电话(传真): 0731-58298966 邮编: 411105

网 址: <http://xtup.xtu.edu.cn>

印 刷: 湘潭市风帆印务有限公司

经 销: 湖南省新华书店

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 20.5

字 数: 499 千字

版 次: 2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81128-157-6

定 价: 39.00 元

(版权所有 严禁翻印)

前 言

本书是根据国家教委颁发的《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》，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5章，共36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和实验课的流程圖。第1章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2~4章共选编了25个有关力学、热学、电磁学、光学和近代物理等方面的实验，每章的前面介绍了一些实验基础知识；第5章选编了11个综合性和设计性实验。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。

在编写过程中力求做到：实验目的具体、突出、要求明确；实验原理叙述清楚；实验内容和步骤详尽；方便学生学习。

本教材由李文斌、刘旺东担任主编，熊文元担任副主编。参加编写的有黄锋、何雄辉、傅晓玲、陆聿文、谭从兵、张丽萍、周达林、蔡静、吴松安。由刘旺东、何雄辉负责统稿。

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工作，它包含了所有曾在物理实验室工作过的同志的贡献。

本书的出版，得到了许多高校老师的大力支持，同时，试用该教材的兄弟院校也为本书的编写提出了许多宝贵的意见，对此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中难免存在漏误之处，恳请读者批评指正。

编 者

2009年12月

目 录

绪论	1
第 1 章 测量误差与数据处理知识	
1.1 测量	5
1.2 测量的不确定度	10
1.3 数据处理方法	30
第 2 章 力学、热学实验	
实验 1 基本测量	45
实验 2 杨氏模量的测量	56
实验 3 测量转动惯量	66
实验 4 测金属丝的线膨胀系数	78
实验 5 气体定律的验证	81
实验 6 空气比热容比的测定	86
第 3 章 电磁学实验	
3.1 电磁学实验基础知识	90
实验 7 电阻的伏安特性研究	98
实验 8 电表的改装和多用表的使用	102
实验 9 用惠斯登桥测电阻	112
实验 10 电位差计测电动势	121
实验 11 模拟法描绘静电场	129
实验 12 多功能电桥测电阻	135
实验 13 示波器的调整与使用	141
实验 14 电子束实验	159
实验 15 数字万用表实验	173
第 4 章 光学与近代物理实验	
4.1 光学实验常规	178
4.2 透镜成像规律	179

4.3	常用光学仪器	180
4.4	实验室常见光源	183
实验 16	分光计的调整与使用	184
实验 17	用分光计测折射率	191
实验 18	用分光计测光栅常数和波长	194
实验 19	用牛顿环测球面的曲率半径	198
实验 20	偏振光的观察和分析	202
实验 21	迈克耳逊干涉仪测波长	208
实验 22	全息摄影	212
实验 23	密立根油滴实验	216
实验 24	夫兰克-赫兹实验	223
实验 25	光电效应法测定普朗克常数	231
 第 5 章 综合性和设计性实验		
实验 26	简单万用表的制作	238
实验 27	声速测定	244
实验 28	光纤传输实验	250
实验 29	压力传感器特性的研究及应用	257
实验 30	多普勒效应综合实验	263
实验 31	用波尔共振仪研究受迫振动	269
实验 32	磁阻效应实验	276
实验 33	物质温度特性实验	282
实验 34	光拍法测量光的速度	288
实验 35	液体粘度的研究	295
实验 36	混沌现象的实验研究	300
 附录		 304

绪 论

实验是人们研究自然规律、改造客观世界的一种特殊的实践形式和手段。人们通过实验发现自然规律,检验自然科学理论,同时,工程设计和生产实际中的问题也要靠实验来解决。

实验不同于对自然现象的直接观察,也不同于生产过程中的直接经验。其特有的优点是:首先,可以利用实验方法控制实验条件,排除外界因素的干扰,从而能有效地突出被研究事物之间的某些重要关系;其次,可以把复杂的自然现象或生产过程分解成若干独立的现象和过程,进行个别的和综合的研究;第三,可以对现象和过程进行满足预期准确度要求的定量测量,以揭示现象和过程中的数量关系;第四,可以进行重复实验,或改变条件进行实验,便于对事物的各方面作广泛的比较和分析等。

本教材以物理实验知识、方法和技能为重点,使学生能通过实验实践来体验和熟悉科学实验的过程和特点

一、物理实验的特点

学生在物理实验课中主要是通过自己独立的实验实践来学习物理实验知识、培养实验能力和提高实验素养,这个学习任务决定了作为实验课程的物理实验有以下几个特点:

(1) 实验带有很强的目的性。无论是应用性实验、验证性实验还是探索性实验,几乎都是在已经确立的理论指导下的实践活动,在有限的时间内,不仅要完成实验课题(实验目的),而且还要完成学习任务(学习要求)。那种把实验课程看成是摆弄摆弄仪器、测测数据就达到目的的单纯实验观点是十分有害的。

(2) 实验要采取恰当的方法和手段,以使所要观测的物理现象和过程能够实现,并达到符合一定准确度的定量测量要求。虽然方法和手段会随着科学技术和工业生产的进步而不断改进,但历史积累的方法仍是人类知识宝库精华的一部分。有了积累才有创新,因此,从一开始就应十分重视实验方法知识的积累。

(3) 实验中所包括的技能,其内容十分广泛。仪器的选择、使用和保养,设备的装校、调整和操作,现象的观察、判断和测量,故障的检查、分析和排除……它有众多的原则和规律,可以说它是知识、见解和经验的积累。唯有实践,才有可能获得这种技能,单凭看书是不可能学到的。

(4) 实验需要用数据来说明问题。数据是实验的语言,物理实验中数据处理有各种不同的方法和特定的表达方式。测量结果,验证理论,探索规律和分析问题,无一不用数据,数据是学术交流和报告技术成果最有力的工具和最准确的语言。

实验集理论、方法、技能和数据于一个整体,它不但要实验者弄懂实验内容与实验方法的道理,而且还要实验者根据这些道理付诸实践,最后还要从获得的数据结果中得出应有的结论,这就是物理实验的特点。

二、物理实验的基本程序和要求

做任何一个实验时,都必须把握住实验预习、实验进行和实验总结这3个重要环节。

1. 实验预习

预习至关重要,它决定着实验能否取得主动和收获的大小。预习包括阅读资料、熟悉仪器和写出预习报告。

仔细阅读实验教材和有关的资料,重点解决3个问题:

- (1) 做什么:这个实验最终要得到什么结果;
- (2) 根据什么去做:实验课题的理论依据和实验方法的道理;
- (3) 怎么做:实验的方案、条件、步骤及实验关键。

预习报告用统一的预习实验报告纸按格式要求书写,并且要求书写整洁、清晰,排版合理。预习报告格式要求:

- (1) 实验名称;
- (2) 实验目的;
- (3) 实验仪器;
- (4) 原理简述(原理、有关定律或公式,电路图或光路图);
- (5) 数据记录表格;
- (6) 预习思考题。

2. 实验的进行

学生进入实验室后,先在实验室准备好的实验情况登记表上签到,然后认真听取实验教师的讲解指导,再按照编组使用相应的指定仪器。应该像科学工作者那样要求自己,井井有条地布置仪器,根据事先设想好的步骤演练一下,然后再按确定的步骤开始实验。要注意细心观察实验现象,认真钻研和探索实验中的问题。不要期望实验工作会一帆风顺,要把遇到问题看做是学习的良机,冷静地分析和处理它。仪器发生故障时,要在教师的指导下学习排除故障的方法。总之,要把重点放在实验能力的培养上,而不是测出几个数据就认为完成了任务。

要做好完备而整洁的记录,例如研究对象的编号,主要仪器的名称、规格和编号;原始数据要用钢笔或圆珠笔记入事先准备好的表格中,如确系记错,也不要涂改,应轻轻画上一道,在旁边写上正确值(错误多的,须重新记录),使正误数据都清晰可辨,以供在分析测量结果和误差时参考。不要用铅笔记录,给自己留有涂抹的余地;也不要先草记在另外的纸上再誊写在数据表格里,这样容易出错,况且,这也不是“原始记录”了。希望同学们注意纠正自己的不良习惯,从一开始就培养良好的、科学的作风。

实验结束,先将实验数据交教师审阅,经教师验收签字后再整理还原仪器,方可离开实验室。

3. 实验总结

实验后要对实验数据及时进行处理。如果原始记录删改较多,应加以整理,对重要的数据要重新列表。数据处理过程包括计算、作图、误差分析等。计算要有计算式(或计算举例),代入的数据都要有根据,便于别人看懂,也便于自己检查。作图要按作图规则,图线要规矩、美观。数据处理后应给出实验结果。最后要求撰写一份简洁、明了、工整、有见解的实

验报告。这些是每一个大学生必须具备的报告工作成果的能力。

实验报告内容包括:

- (1) 实验名称;
- (2) 实验目的;
- (3) 实验仪器;
- (4) 实验原理 简要叙述有关物理内容(包括电路图或光路图或实验装置示意图)及测量中依据的主要公式,式中各量的物理含义及单位,公式成立所应满足的实验条件等;
- (5) 实验步骤 根据实验过程写明关键步骤;
- (6) 注意事项;
- (7) 数据报告与数据处理 列表报告数据,完成计算、曲线图、不确定度计算或误差分析,最后写明实验结果;
- (8) 小结和讨论 内容不限,可以是对实验中现象的分析,对实验关键问题的研究体会,实验的收获和建议,也可以是实验思考题的解答。

三、物理实验成绩评定记分标准(参考使用)

1. 到课准时(10分)

到课准时,以上课铃声为准。到课准时者记10分,迟到者扣10分。

2. 预习报告(10分)

(1) 预习报告用统一的预习实验报告纸按格式要求书写,且书写整齐、清晰,排版合理者,记10分。预习报告格式要求:

- ① 实验名称;
- ② 实验目的;
- ③ 实验仪器;
- ④ 原理简述(原理、有关定律或公式,电路图或光路图);
- ⑤ 数据记录表格;
- ⑥ 做好预习思考题。

(2) 在上面格式要求中任缺一项扣2分,可累计扣分。

(3) 格式基本达到要求,但书写潦草者可酌情扣分。

3. 实验操作(40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,记满分即40分。

(2) 抄数据者扣40分。

(3) 实验过程中,根据实验步骤和实验程序规范程度及实验数据合乎要求的情况视情形酌情记分。

(4) 粗心大意损坏仪器,除按规定赔款外,另扣10分。

4. 文明卫生纪律(5分)

(1) 遵守实验室规则,在实验过程中始终遵守纪律、认真完成实验,不随意在实验室内、外走动,不在实验室吃东西、吸烟、乱丢纸屑者,记满分即5分。

(2) 违反上款一项者扣5分。

(3) 实验完毕后,老师要求学生打扫室内卫生,不打扫者扣5分。

(4) 上实验课闲谈、大声喧哗或不听指导者,扣 5 分。

(5) 上实验课违反纪律屡教不改或早退者,本次实验成绩记 0 分。

5. 仪器整理(5 分)

(1) 实验完毕,学生按要求主动整理好仪器的,记 5 分。

(2) 实验完毕,学生没有整理仪器的,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(30 分)

(1) 实验报告用统一的实验报告纸按格式要求书写,实验数据按要求处理并有实验结果表示,报告书写整洁、清晰,布局合理者,且附有预习报告和原始记录,可记 30 分。实验报告格式要求:

- ① 实验名称;
- ② 实验目的;
- ③ 实验仪器;
- ④ 实验原理(简单扼要);
- ⑤ 实验步骤;
- ⑥ 注意事项;
- ⑦ 实验数据及处理(要有明确结果);

⑧ 体会(讨论或答思考题)。

(2) 没有数据处理、计算过程以及最后结果表示的扣 15 分。

四、实验课程流程图

实验课程的流程图如图 0-1 所示。

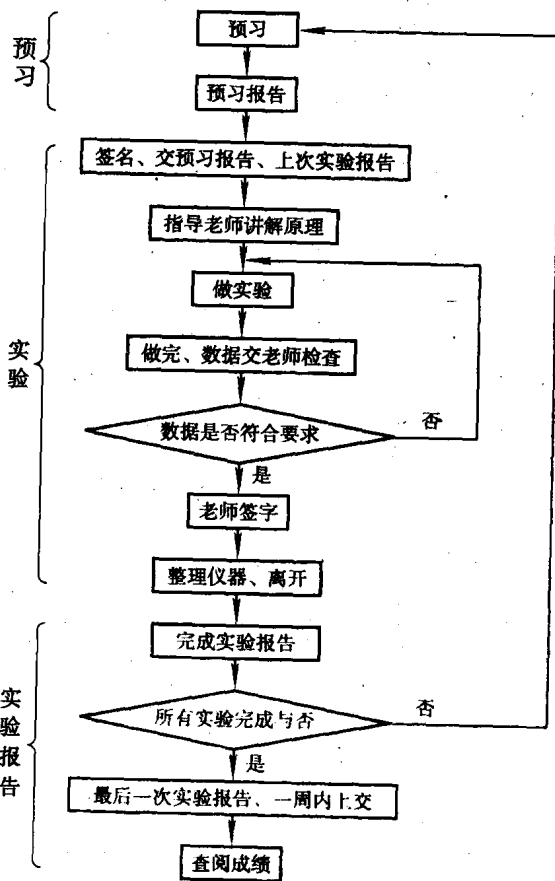


图 0-1 实验课程流程图

第 1 章 测量误差与数据处理知识

1.1 测量

在物理实验中,不仅要定性地观察物理现象,而且还需要定量地测量有关物理量。测量就要取得数字,记录数据,计算和报告数据,这里都存在有效数字取位的问题。因此,从实验课一开始,就要建立有效数字的概念,并强调通过练习达到熟练掌握和运用于每一个数据的目的。

1.1.1 测量的定义

1. 测量的定义

以确定量值为目的的一组操作称为测量(或计量)。

测量的过程就是把被测物理量与选作计量标准单位的同类物理量进行比较的过程。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。例如真空中的光速是一个不变的量,国际单位制由此规定以光在真空中 $1/299\,792\,458\text{ s}$ 的时间间隔内所经路径的长度作为长度单位—— 1 m 。

测量一个物体的长度,就是找出该被测量是 1 m 的多少倍,这个倍数称为测量的读数。数值连同单位记录下来便是数据,称为量值。量值用数值和单位的乘积来表示。

例如,钠光的一条谱线的波长为 $\lambda=589.6\times 10^{-7}\text{ m}$,它是单位 m 和数值 589.6×10^{-7} 的乘积。

2. 直接测量和间接测量

根据获得数据的方法不同,测量可分为直接测量和间接测量两类。

(1) 直接测量

把被测量直接与标准量(量具或仪表)进行比较,直接读数,直接得到数据,这样的测量就是直接测量,相应的物理量称为直接测量量。例如用米尺测量长度,用天平测量质量,用欧姆表测量电阻等。

直接测量是测量的基础。

(2) 间接测量

大多数物理量没有直接测量的量具或仪表,不能直接得到测量数据,但能够找到它与某些直接测量量的函数关系。测出直接测量量,通过函数关系得到被测量的测量数据,这种测量称为间接测量,相应的物理量就是间接测量量。

例如圆的半径 r , 若圆心不能确定就不能直接测量, 但可测量直径 d , 然后通过公式 $r = d/2$ 算出半径, 这就是间接测量。这时半径 r 就是间接测量量。实际中间接测量远远多于直接测量。实际中的原理、方法、步骤、计算等, 大都是间接测量的内容; 实验方法、实验技术也主要在间接测量范围之内。

3. 基本单位和导出单位

不同的物理量有各自不同的单位, 而各物理量不是相互独立的, 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。独立定义的单位叫做基本单位, 相对应的物理量叫做基本量; 由基本单位推导出的单位叫做导出单位, 相对应的物理量叫做导出量。

需要注意的是, 在测量中区分的直接测量量和间接测量量, 与在计算单位中规定的基本量和导出量, 两事件之间没有对应关系。例如, 物理的质量, 它的单位 kg 是基本单位, 若用天平测量, 它是直接测量量; 若把它浸没在量筒中的水里测出体积 V , 从手册中查出该物质的密度 ρ , 再用公式 $m = \rho V$ 计算, 则该质量就是间接测量量了。

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。现在, 我国已建立了与国际计量单位一致的, 米、秒、千克、开尔文、安培、坎德拉 6 个基本单位的基准, 其中有的基准完成了实验基准向自然基准过渡的工作。如实现米的新定义的碘稳频 He-Ne 激光器, 实现 1990 年国际温标中用的中、高温固定点及铂电阻温度计, 绝对重力仪等, 主要技术指标都达到国际先进水平, 有的还处于国际领先地位。在开展国际量值比对中, 我国的国际地位不断提高, 计量科学技术水平在国际上的声誉和威望越来越高。在 50 多个物理量中, 我国现已建立起 142 项国家基准和标准, 并相应建立了各级计量(技术监督)部门、量值传递系统、管理制度和专门的计量人员队伍。我国计量科学的水平在世界上已步入领先的行列。

1.1.2 有效数字

1. 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(图 1-1-1), 我们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 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(图 1-1-2),从尺的刻度可以直接读出 4.2 cm,再估读到 1/10 格值,测定铜棒的长度为 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。

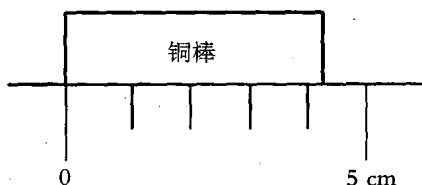


图 1-1-1 用厘米分度尺测量铜棒的长度

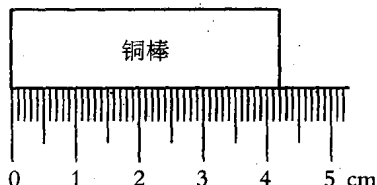


图 1-1-2 用毫米分度尺测量铜棒的长度

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,用毫米分度尺测量的结果变为 4 位有效位。可见,有效位的多少还与被测量的大小有关。

有效位的多少,是测量实际的客观反映,不能随意增减测量值的有效位。

(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有意义的数字和能够估读出来的数字。

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 1-1-1 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 1-1-3 是估读到 1/5 格值的例子。

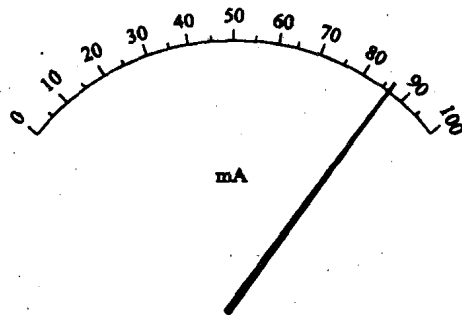


图 1-1-3 估读到 1/5 格值

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 1-1-4 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,不可以读出 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。

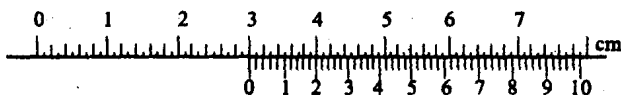


图 1-1-4 游标对准主尺 3 cm 刻线

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数字均为有效数。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 第一位非零数字左边的零。第一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:

$$4.30 \text{ cm} = \underline{0.0430} \text{ m} = 43 \text{ } \underline{000} \mu\text{m} = \underline{0.0000430} \text{ km},$$

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 43 000 μm 还错误地反映了有效位。为了正确表达出有效数字,实验中常采用科学记数法,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,特别是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。

2. 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。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。

$$\begin{aligned} \text{例 1.1.1} \quad 13.6 \underline{5} + 1.622 \underline{0} &= 15.2 \underline{7}, \\ 16.6 - 8.3 \underline{5} &= 8. \underline{2}. \end{aligned}$$

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。建议:如果所得的积或商的首位数字为 1、2 或 3 时,要多保留一位有效数字。

$$\begin{aligned} \text{例 1.1.2} \quad 24 \text{ } \underline{320} \times 0.341 &= 8.29 \times 10^3, \\ 85 \text{ } \underline{425} \div 125 &= 683, \\ 12 \text{ } \underline{345} \div 98 &= 126. \end{aligned}$$

③ 对数运算。对数结果其小数点后的位数与真数的有效位数相同。

$$\text{例 1.1.3} \quad \lg 543 = 2.735.$$

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。

$$\begin{aligned} \text{例 1.1.4} \quad \sin 30^\circ \underline{2}' &= 0.500 \text{ } \underline{503} \text{ } \underline{748}, \\ \sin 30^\circ \underline{3}' &= 0.500 \text{ } \underline{755} \text{ } \underline{559}, \end{aligned}$$

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

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。本章1.2.4节中也是用求微分的方法进行不确定度的传递。

例 1.1.5 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比参加运算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1.1.4和例1.1.5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:

712.35 g 修约成 712.3 g,

614.470 g 修约成 614.5 g。

例如修约间隔是1 000 m,则85.47 km 修约成 85 km 或 85×10^3 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。

1.1.3 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 ± 不确定度的值) 单位,

或 被测量的符号 = 测量结果的值 (不确定度的值) 单位。

关于测量的不确定度, 本章 1.2 节将专门讲述, 这里只说明测量结果表示中数值的有效位。

2. 不确定度的有效位

不确定度的值通常只取 1 位或 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:

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

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。

1.2 测量的不确定度

在报告物理测量的结果时, 不但要写明计量单位, 而且还有责任给出表示测量质量的某些指标, 这样才算是完整的报告。没有单位的数据, 不能表示被测量大小的特征; 没有测量结果的质量表示, 使用它的人不能判定其可靠程度, 测量结果也不能比较, 既不能自身比较, 也不能与说明书和标准给出的参考值比较。这个评定测量结果质量如何的指标就是不确定度。

然而对于测量数据的处理、测量结果的表达, 长期以来在各个国家和不同学科有不同的看法和规定, 有关术语的定义也不统一, 从而影响了国际间的交流和对各种成果的互相利用。1980 年 10 月, 国际计量局(BIPM)综述了来自 21 个国家的意见, 提出了《关于表述不确定度的建议草案》, 在 1981 年 10 月召开的 BIPM 第 70 届会议上修改通过, 编号为 INC-1(1980)。于是, 《建议 INC-1(1980)》成为国际性指导文件。

1986 年成立了国际不确定度工作组, 负责制定用于计量、标准、质量、认证、科研、生产中的不确定度指南。国际不确定度工作组成员中有中国的代表。

1993 年, 国际计量局(BIPM)、国际电工委员会(IEC)、国际临床化学联合会(IFCC)、国际标准化组织(ISO)、国际理论与应用化学联合会(IUPAC)、国际理论与应用物理联合会(IUPAP)和国际法定计量组织(OIML)7 个国际组织正式发布了《测量不确定度表示指南》(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM), 为计量标准的国际化和测量不确定度的表述奠定了基础。

GUM 被译为许多种文字, 得到了广泛的应用。许多国家的计量实验室、校准实验室、

检测实验室和国际组织都制定了相应的规定和准则,来规范各自领域中测量不确定度的计算和表达,从而促使科学、技术、商业、工业、卫生、安全和管理等各方面对测量的结果及其质量有统一的认识、理解、评价和比较。

为了贯彻实施 GUM,统一我国对测量不确定度的评定方法,加速与国际惯例接轨,我国制定了一系列技术标准,其中要求对测量不确定度进行全面评价,特别是国家质量技术监督局于 1999 年 1 月 11 日发布了新的计量技术规范《JJF1059—1999 测量不确定度评定与表示》,代替《JJF1027—1991 测量误差及数据处理》中的误差部分,并于 1999 年 5 月 1 日起实行;同时利用专著、期刊、讲座、培训班普及测量不确定度的知识,宣传不确定度的实际应用经验。在我国实施 GUM,科学、准确、规范地表述测量结果,不仅是工程技术和学术交往的需要,也是全球市场经济发展的需要。为培养面向 21 世纪的科技人才,物理实验课的教学要积极采用国际通用的标准和指南。

1.2.1 测量的不确定度

本节给出关于不确定度的一些基本资料,这些资料引自不确定度的专著和文献。陌生的名词、术语读起来可能枯燥和费解,希望读者能耐心地读下去,读后获得关于不确定度的一些印象,目的就达到了。1.2.2~1.2.4 节会具体地讲述不确定度的计算方法和表达方法,读者完全能读懂;然后还需再阅读本节,以获得对不确定度的理解。本节还可作为 1.2 节的小结,也可以像手册那样用来查询。

1. 测量不确定度

(1) 测量不确定度的定义

测量不确定度是与测量结果相联系的参数,表征合理地赋予被测量之值的分散性。

从词义上理解,测量不确定度是测量结果有效性的可疑程度或不肯定程度;从统计概率的概念上理解,它是被测量的真值所处范围的估计值。真值是一个理想化的概念,是实际上难以操作的未知量,人们通过实际测量所得到的量值赋予被测量,这就是测量结果。这个结果不必然落在真值上,即测量结果具有分散性。因此还要考虑测量中各种因素的影响,估算出一个参数,并把这个参数赋予分散性。也就是说,用一个恰当的参数来表述测量结果的分散性,这个参数就是不确定度。

① 这个参数,可以是标准偏差 s ,可以是 s 的倍数 ks ,也可以是具有某置信概率 p (例如 $p=95\%$ 、 99%)的置信区间的半宽。

② 测量不确定度一般由若干分量组成,这些分量恒只用实验标准偏差给出而称为标准不确定度。其中如果由测量列的测量结果按统计方法估计,则称之为 A 类标准不确定度;其中如果由其他方法和其他信息的概率分布估计,称之为 B 类标准不确定度。这些标准不确定度现均用符号 Δ 表示,如 $\Delta(x)$ 或 Δ_x 。

③ 实验的测量结果是被测量之值的最佳估计以及全部不确定度成分。在不确定度的分量中,也应包括那些由系统效应,如与修正值、参考计量标准器有关的不确定分量,这些分量都对实验结果的分散性有“贡献”。

(2) 不确定度的常用术语与定义

标准不确定度:用标准差表示的测量不确定度。

A 类标准不确定度评定或标准不确定度的 A 类评定:用对观测列进行统计分析的方