

大学物理实验

Daxue Wuli Shiyan

□ 季诚响 肖昱 主编 □

Experiment of
College Physics



国防工业出版社

National Defense Industry Press

大学物理实验

季诚响 肖昱 主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是根据教育部《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》,在装甲兵工程学院 2001 版和 2004 版教材的基础上,结合教学实践编写而成的。

全书分 6 章。第 1 章介绍测量误差、不确定度基础、不确定数据处理的常用方法和物理实验的基本方法和技能,第 2 章、第 3 章是预备性和基础性实验,依据课程标准所要求的必修内容,侧重基本实验知识、基本方法、基本技能的训练;第 4 章的近代综合实验和第 5 章的设计性实验,主要培养学生综合运用实验方法和实验仪器,来解决实际问题的能力,侧重于综合能力的提高;在第 6 章专门介绍了 MATLAB 语言及其对实验数据的数学处理方法。

本书可作为高等工科院校及师范院校非物理专业类学生的物理实验教材,也可作为有关教师、实验技术人员进修培训的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 季诚响, 肖昱主编. —北京: 国防工业出版社, 2007. 9

ISBN 978 - 7 - 118 - 05309 - 8

I. 大... II. ①季... ②肖... 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(2007)第 118307 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 15 字数 342 千字

2007 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

《大学物理实验》

编 委 会

主编 季诚响 肖 昱

参编 杨小静 赵莉丽 张 民 曾乐贵

王立丹 张贺南 刘名扬 杜 健

审校 孙维瑾 费保俊

前 言

本书是根据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》,在装甲兵工程学院2001版、2004版教材的基础上,按照2005年“大学物理实验”课程标准,结合教学实践编写而成的,既考虑到实验教材的适用性,也照顾到一般工科院校专业设置的特点和实验室仪器设备的现状。

本教材在教学内容上,力图把改革思想结合进去。本书在体系结构上,改变了按力、热、电、光编排的传统模式;在内容安排上,增加了近代综合和设计性实验比重,突出能力培养;在教学环节上,减少步骤叙述,增加研究与思考,体现以学为主的现代教育理念。

本书的前5章为必修内容。第1章是物理实验的基础知识,主要介绍测量误差、不确定度基础,实验数据处理的常用方法和物理实验的基本方法和技能;第2章是预备性实验,通过力、热、电、光一些典型实验的教学,进行实验知识和技能的铺垫;第3章为基础性实验,依据课程标准所要求的必修内容,侧重基本实验知识、基本方法、基本技能的训练;第4章的近代综合实验和第5章的设计性实验,主要培养学生综合运用实验方法和实验仪器来解决实际问题的能力,侧重于综合能力的提高。

另外,本书还增加了第6章作为选修或自学之用,专门介绍了MATLAB语言以及对实验数据的数学处理方法。我们认为,在科学技术高速发展的今天,加强物理实验与数学方法的结合,对于培养学生的科学研究方法和技能,提高学生的科学研究水平和综合素质是大有裨益的。

实验课程建设是一项团队事业,无论是仪器设备的准备、实验教材的编写,还是实验的开出都是实验室全体任课教师长期辛勤耕耘、不断改进、充实和完善的成果。实验教材的出版,集中了历年实验教师的集体智慧。本书由季诚响、肖昱、杨小静、赵莉丽、张民、曾乐贵、王立丹、张贺南、刘名扬、杜健、孙维瑾和费保俊等共同编写。具体分工为:季诚响编写绪论、第2章部分内容、实验3.2、实验3.3部分内容、实验3.4、实验4.1、第5章和附表;肖昱编写第1章、实验3.7、实验3.8和实验3.10;杨小静编写第2章部分内容、实验3.3部

分内容和实验 4.5;赵莉丽编写实验 3.5、实验 4.6 和实验 4.7;曾乐贵编写实验 4.3 和实验 4.4;王立丹编写实验 3.1 和实验 3.6;张贺南编写实验 3.9 和实验 4.2;刘名扬编写实验 3.11;杜健编写第 6 章;孙维瑾副教授参与了书稿的审阅和修改,并提出了很好的修改意见;费保俊教授审阅了全书,并负责统稿和整个编排工作。

在本书的编写过程中,参阅和借鉴了兄弟院校的有关教材和经验,得到校内外不少同仁的帮助,在此深表谢意。对于装甲兵工程学院梁永生院长、训练部迟宝山部长、李胜利处长和基础部杨万利主任的一贯支持,表示衷心地感谢。

本书可作为高等工科院校及师范院校非物理专业类学生的物理实验教材,也可作为有关教师、实验技术人员进修培训的参考资料。由于编者水平有限,书中如有不当之处,恳请读者批评指正。

编 者
2007 年 6 月

目 录

绪论	1
第 1 章 物理实验的基本知识	4
1.1 测量及其误差	4
1.2 有效数字及其运算	6
1.3 测量的不确定度及其评定	8
1.4 数据处理的常用方法	14
1.5 物理实验的基本方法和技能	24
第 2 章 预备实验	32
2.1 长度测量	32
2.2 质量测量	36
2.3 气垫导轨上的实验	42
2.3.1 速度和加速度的测量	43
2.3.2 动量守恒定律的研究	45
2.4 电表的改装与校准	49
2.5 用电位差计测电动势	52
2.5.1 线式电位差计	53
2.5.2 用直流电位差计测量电动势	56
2.6 透镜焦距的测量	62
第 3 章 基础实验	68
3.1 刚体转动惯量的测定	68
3.2 单双臂电桥	73
3.3 热敏电阻的特性	79
3.4 气体比热容比的测量	87
3.5 示波器的使用	90
3.6 用霍尔元件测磁场	95
3.7 等厚干涉实验	99

3.8	分光计的调整与光栅衍射	104
3.8.1	分光计的调整与使用	105
3.8.2	测量三棱镜顶角	109
3.8.3	用最小偏向角法测棱镜的折射率	111
3.8.4	光栅衍射	112
3.9	光电效应测定普朗克常数	115
3.10	迈克尔逊干涉仪实验	122
3.11	计算机模拟法测量	129
3.11.1	椭圆仪测量薄膜厚度	132
3.11.2	阿贝成像原理与空间滤波	135
第4章	近代和综合实验	141
4.1	全息照相实验	141
4.2	弗兰克—赫兹实验	148
4.3	用密立根油滴法测电子电量	152
4.4	核磁共振实验	157
4.5	用动态法测量金属杨氏模量	165
4.6	传感器综合实验	171
4.6.1	电容式传感器的位移实验	171
4.6.2	直流电桥的应用——电子称实验	172
4.7	音频信号光纤传输技术实验	174
第5章	设计性实验	184
5.1	设计性实验基础知识	184
5.2	全息光栅的制作和光栅常数的测定	185
5.3	测量液体折射率实验研究	187
5.4	转速的测定	188
5.5	数字温度计的设计和制作	192
5.6	声光控延时电路	194
5.7	用超声波测量气体的比热容比	198
第6章	实验数据的计算机处理方法	201
6.1	MATLAB 简介	201
6.2	代数插值方法	203

6.3 曲线拟合方法.....	208
6.4 微元分析方法.....	212
附录 I 基本物理常量表.....	220
附录 II 国际单位制简介.....	221
附录 III 历届诺贝尔物理奖一览表.....	224
参考文献.....	231

绪 论

1. 物理实验在物理学发展中的重要作用

物理学是研究物质结构、物质运动及物质间相互作用的最基本规律的科学,物理实验正是物理学探索这些规律的唯一途径。如果说物理学是自然科学的基础,那么毫不夸张地说物理实验就是物理学的基础,它在物理理论的形成、建立及发展中都起了非常重要的作用。

纵观物理学发展的历史,不难发现大量的物理概念及规律都建立在实验事实的基础之上。例如经典力学、热学、电磁学的众多规律都是从实验事实中归纳和总结得到的;原子结构核式模型的提出是基于 α 粒子大角散射的实验事实;贝克勒尔和居里夫妇对放射性的研究以及电子的发现导致了原子物理和核物理的诞生;为了解释黑体辐射的实验定律,普朗克提出了能量子假说,使物理学进入了量子时代。

今天物理学对客观世界的探索能向深度和广度两个方面不断扩展,更是得益于实验设计思想、实验手段的进步以及实验仪器精度的提高。因此,物理实验是物理学发展的源泉和动力。

物理实验对于物理学发展的重要作用还在于任何理论上的假设或推理要成为被公认的物理规律,都必须得到实验的验证。

光的“波动说”和“微粒说”之间的论战旷日持久,是杨氏双缝干涉实验在当时判定了“波动说”的胜利;1865年麦克斯韦将经典电磁规律归纳为四个基本的场方程,并预言了电磁波的存在,但直到1879年,赫兹通过实验证实了电磁波的存在,麦克斯韦的电磁场理论才得到了公认;1905年为了对光电效应现象作出解释,爱因斯坦提出了光量子假说并给出了光电效应方程,但直到1916年密立根通过实验严格验证了光电效应方程,他的这一理论才得到了公认,他本人也因为揭示光电效应规律获得了1922年的诺贝尔物理学奖;1924年德布罗意在光波具有微粒性的启发下,提出“物质波”的假说,即实物粒子也具有波粒二象性,他还给出了关于粒子动量、能量与波长及波矢量间关系的德布罗意公式,这一大胆而伟大的假设在1927年由戴维孙和革末的电子衍射实验证实,德布罗意随即在1929年获得了诺贝尔物理学奖;至于实验物理学家吴健雄用实验证实杨振宁、李政道提出的弱相互作用中宇称不守恒的设想,导致中国人首次获得诺贝尔物理学奖,更是物理学史上的经典之作……

从1901年—2006年,著名的诺贝尔物理学奖已经颁发了100届,共有178位物理学家获奖,其中2/3以上的物理学家是因为在实验物理方面的杰出贡献而获奖(见附录Ⅲ)。这也从一个方面反映出了物理实验对于物理学发展的重要作用。

我们强调实验的重要性,并不否定理论的巨大价值。科学是用理论和实验这两只脚前进的,有时先迈出这只脚,有时先迈出另一只脚,但是前进要靠两只脚,先建立理论然后通过实验验证或修正,或者是先在实验中得出了新的关系,然后再建立理论,物理学正是

在理论和实验相互促进、交替前进的过程中不断发展起来的。

2. 物理实验课的目的与任务

物理实验是大学阶段的第一门实验课程,是学生未来从事科研工作的起点,学习物理实验课的更为重要的意义在于提高自身的科学素养,训练学生进行科学实验的基本技能。具体表现在:

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

(2) 培养与提高学生科学实验的能力。

自学能力——通过阅读教材、仪器使用说明书,参考资料,能正确理解实验内容,概括出实验原理和方法的要点。

动手能力——能正确调整和使用常用仪器,掌握基本物理量的测量方法和实验技能,得出准确的实验结果。

表达能力——能够正确记录和处理实验数据,分析实验结果,撰写符合要求的实验报告或科研论文。

设计能力——能够根据课题要求,自行设计方案,确定实验方法和条件,合理选择仪器,拟定具体的实验程序。

创新能力——能观察、发现新问题,突破传统思维定势,创造性地提出新的方案和进一步研究的方向。

(3) 培养与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,严肃认真的工作态度,主动研究、勇于探索的创新精神,遵守纪律、团结协作和爱护公物的优良品德。

3. 物理实验课的主要教学环节

为达到物理实验课的目的,学生应重视物理实验教学的三个重要环节。

实验预习

预习是上好实验课的基础和前提。课前要仔细阅读实验教材和有关参考资料,明确实验目的;搞清楚实验内容,测试什么量,使用什么方法,实验的理论依据(原理)是什么,使用什么仪器,其性能是什么,如何使用(最好到实验室对照实物或在教学网络上对照仿真实物熟悉仪器),操作要点及注意事项等。在此基础上写出实验预习报告。

预习报告内容包括:

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验仪器:根据实验原理选择实验仪器并列出主要仪器名称、型号、规格、精度。

(4) 实验原理:包括简要的实验理论依据,实验方法,主要计算公式及各量意义,电路图、光路图或设备示意图;有些实验还要写出自拟的实验方案,设计的实验线路,选择的仪器等。

(5) 实验步骤:扼要地说明实验的关键步骤和主要注意事项。

(6) 数据记录表格设计:待测量、单位、测量次数。

(7) 回答预习思考题。

实验操作

学生进入实验室后,首先要遵守实验室规则,主动接受教员对预习情况的检查和重点指导,合理布置、安装和调试仪器,安全操作,注意细心观察实验现象,认真思考,刻苦钻研和探索实验中的问题,做到细观察、多动手,勤思考、会判断,敢问几个为什么,克服不动脑筋的机械操作。数据记录必须详尽、真实,决不能任意伪造或篡改,并用钢笔或圆珠笔正确记录,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。

实验总结

实验操作完毕,要对实验数据进行整理讨论,然后用简洁文字撰写实验报告。这个过程,是学生进行综合思维能力和文字表达能力训练的过程,也是日后科学研究、撰写科技论文的基础。需要认真真地书写,规规矩矩地描画,做到字迹清楚、文理通顺、图表规范、数据完备、结论明确、讨论认真、富有创意。

实验报告包括以下内容:

- (1) 实验名称。
- (2) 实验目的。
- (3) 实验仪器,包括型号,规格,编号等。
- (4) 实验原理:简述实验的理论依据,列出待测量的计算公式,设计实验要画出光路图、电路图或仪器示意图。
- (5) 数据处理:将预习报告所记录的数据完整仔细转记过来,根据实验目的要求对测量结果进行计算或作图表示,并对测量结果进行评定,计算不确定度,最后写出实验结果。
- (6) 问题讨论:对实验中观察到的现象进地分析和解释,分析实验误差的主要来源,对实验仪器的选择和实验方法的改进提出建议,简述做实验的心得体会,回答实验思考题等。

第 1 章 物理实验的基本知识

科学实验是以测量为基础的,而任何测量都伴随有误差。因此,测量前对测量中可能产生的各种误差进行分析,测量中尽可能消除其影响,测量后对未能消除的误差作出估计,从而对测量结果的可靠性作出评价,是物理实验乃至科学实验必不可少的工作。本章介绍误差和数据处理的基本知识以及物理实验的基本方法和技能。

1.1 测量及其误差

1. 测量

测量的实质就是将被测量直接或间接地与作为标准的量进行比较的过程。测量的结果应该包括测量量的数值、单位以及测量结果的可信程度。

(1) 直接测量与间接测量

按测量的方式测量可分为直接测量和间接测量。直接测量是指把待测的物理量与作为标准的物理量直接进行比较,例如用米尺测量物体的长度、用天平测量物体的质量、用电流计测量电路中的电流强度都是直接测量。相应的测量量称做直接测量量。实际中更多的物理量不能直接用仪器测出,通常是根据其直接与直接测量量间的函数关系计算得到的,这样的测量称做间接测量,相应的测量量称做间接测量量。例如,测量物体的密度,实际是测出物体的质量和体积,然后根据 $\rho = V/m$ 算出物体的密度,这里密度就是间接测量量。

(2) 等精度测量与不等精度测量

按测量的条件,测量可分为等精度测量和非等精度测量。等精度测量指在完全相同的条件下对同一物理量进行的多次重复测量,例如由同一操作者、使用同一仪器、采用同样的测量方法并在相同的条件下对同一物理量进行的多次测量就是等精度的。反之,如果在对同一物理量进行的多次重复测量时,实验条件发生了变化,例如选用仪器不同、测量方法不同或测量人员不同等,则这一系列测量就是不等精度的。

本课程主要讨论等精度测量,如无特别说明,多次测量均指等精度测量。

2. 测量误差

1) 误差的表示

被测物理量的客观实际值称做真值。由于受理论的近似性、实验方法不够完善、实验仪器的灵敏度和分辨能力有限以及环境、人员等因素的影响,任何测量结果与其真值间都存在一定的偏差,测量值与其真值之差称做误差或绝对误差,若以 x_0 表示真值, x 表示测量值, Δx 表示误差,则有

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.1 - 1)$$

误差与真值之比的百分数称做相对误差,用 E 表示:

$$E = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.1-2)$$

由于真值无法知道,计算相对误差时常用测量量的理论值或公认的约定值代替真值。

2) 误差的分类

根据误差的性质和产生的原因,误差一般可分为系统误差、偶然误差和粗大误差。

(1) 系统误差。在对同一被测量的多次测量过程中保持恒定或按一定规律变化的误差分量称做系统误差。系统误差的来源主要有以下几个方面。

仪器误差。由于仪器本身的灵敏度、分辨能力的限制或是没有按规定条件使用仪器而造成的误差。如天平的零点不准,电表刻度不均匀等。

理论误差。由于测量所依据的理论公式本身的近似性,或实验条件不符合理论公式所规定的要求以及实验方法不完善等引起的误差。

观测误差。由于观测者个人生理和心理因素造成的误差。如有的人读数时总是斜视,计时总滞后等。

(2) 偶然误差。在对同一被测量的多次测量过程中,绝对值和符号以不可预知的方式变化的误差分量称做偶然误差。偶然误差是由实验中各种因素的微小变化引起的。例如,实验装置和测量机构在每次调整操作上的变动;环境温度、空气湿度的波动,测量仪器指示数值的变动;观察者本人在判断和估计读数上的变动等。这些干扰均带有偶发性,既不可能预测,也不可能控制,它们的共同影响就使测量值围绕测量的平均值发生涨落,这种涨落变化就是各次测量的偶然误差。

(3) 粗大误差。由于测量者的过失,如实验方法不合理,操作不当,读错数据等引起的误差称做粗大误差。这是一种人为的测量错误,严格地说它不属于测量误差,测量者采取严肃认真的态度,尽量避免,一旦发生,应将相应的数据剔除。

3) 误差的处理

误差虽然不可避免,但应尽量减小。

系统误差的处理。系统误差的处理是一个比较复杂的问题,没有一个简单的公式,需要根据具体情况作具体处理。对来源及大小可以确定的已定系统误差可以通过校准仪器,改进方法、修正结果等方法来减小或抵偿;对于未定系统误差,则可估算出其误差限值,将其影响归于 B 类不确定度。

偶然误差的处理。当测量次数足够多时,偶然误差服从一定的统计规律。实验和理论均表明大部分偶然误差服从正态分布,如图 1.1-1 所示。

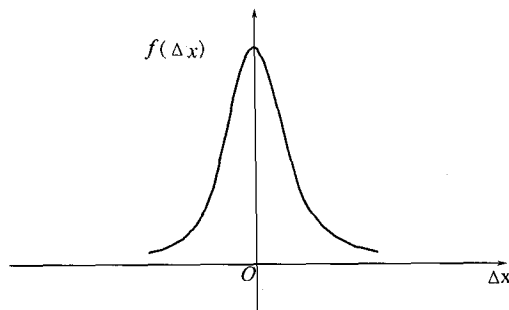


图 1.1-1 偶然误差的正态分布曲线

偶然误差具有以下特点。

单峰性: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。

对称性:绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相同。

有界性:绝对值很大的误差出现的概率趋于零。

抵偿性:当测量次数为无限多时,偶然误差的算术平均值趋于零。

根据上述特点可知,增加测量次数,可以减小偶然误差。

4) 测量结果的最佳值

在一定的实验条件下,获得最佳的测量结果是科学实验追求的目标。设对某一物理量 x 进行了 n 次等精度测量,测量值为一组数 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 我们称这样的一组数为测量列。测量列的算术平均值为

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

由误差的定义

$$\Delta x_1 = x_1 - x_0, \Delta x_2 = x_2 - x_0, \dots, \Delta x_i = x_i - x_0$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - x_0 = \bar{x} - x_0$$

由于偶然误差的抵偿性,测量次数越多,偶然误差的平均值越小,测量列的算术平均值越接近真值,因此从偶然误差的角度考虑,测量列的算术平均值是最佳值。考虑到系统误差,如果有已定的系统误差,例如仪器的零点误差等,还应在结果中扣除。对于等精度测量,测量结果的最佳值是扣除了已定系统误差后测量列的算术平均值。对于不等精度测量,可以证明测量结果的最佳值是扣除了已定系统误差后测量列的加权平均值。

1.2 有效数字及其运算

1. 有效数字的概念

为了使测量结果既能反映测量值的大小,又能反映测量的精度,测量结果的位数不能任意取舍。用仪器测量时,能由仪器刻度读出的数字是没有误差的称做可靠数字,而仪器分度以下的数值是由测量者估计的,包含了误差,称做欠准数字或存疑数字。显然只需一位欠准数字即可反映测量的精度,因此把由 n 位准确数字与最后一位存疑数字组成的数字称做测量的有效数字。例如,用毫米(mm)分度的直尺测量某物的长度,有效数字应读到毫米(mm)的十分位如 16.8mm,其中 16 是根据直尺的刻度读出的,是可靠的,而末位的 8 是估读的,是存疑数字。

对有效数字的处理应注意以下几点:

(1) 在有效数字中,小数点后末尾的“0”不能舍去。例如用分度值为毫米(mm)的直尺测量某物的长度,若它的末端恰好与直尺上 86mm 的刻线重合,测量结果应为 86.0mm,不能把“0”略去记为 86mm。虽然从数值上看 86.0mm 与 86mm 是一样的,但从测量的角度看 86.0 与 86 意义完全不同,86.0mm 表明测量的误差位在毫米(mm)的十分位,86mm

表明测量的误差位在毫米(mm)位,二者的测量精度差一个数量级。

(2) 有效数字的位数与小数点位置无关。例如:

$$85.48\text{cm} = 854.8\text{mm} = 0.8548\text{m} = 0.0008548\text{km}$$

测量单位的变化只改变有效数字中小数点的位置,而有效数字的位数仍保持4位不变。

(3) 有效数字中数值前面小数点定位所用的“0”不是有效数字,有效数字数字中间和数字末尾的“0”是有效数字。例如,0.0002m的有效数字只有1位,1.005m有4位有效数字,5.00m有3位有效数字。

(4) 对较大或较小的有效数字,书写时常采用科学记数法(写成 $\times 10^n$ 的形式)。通常小数点前只写1位数字。例如地球的平均半径6371km可写为 $6.371 \times 10^6\text{m}$,仍是4位有效数字。

2. 有效数字的估读规定

(1) 对线性刻度的仪表(如直尺、螺旋测微计、刻度均匀的电表)估读到最小分度的下一位。

(2) 对非线性刻度的仪表、示值跳变的仪表(如数字显示仪、机械停表、电动停表等)及分度值与不确定度大致相当的仪表(如游标卡尺)只读到其最小分度或最小分度的整数倍。

读取数据时所读取的数的最后一位应是读数误差产生的位。注意不要把“存疑”与“估计”等同。例如,量程为1mA~200mA的电流表,其分度值为2mA,可估读到分度的1/10,若指针在114~116两分度线之间,在距116 4/10格处,应估读为115.2mA,其中,5.2两位都是估读的,但误差仅存在于最后一位2上,存疑的只有1位。

3. 有效数字的运算法则

测量结果的有效数字,只能保留一位欠准数,直接测量是这样,间接测量也是这样。根据这一原则,为了简化有效数字的运算,约定下列规则:

1) 加减运算

加减运算结果的有效数字与参与运算的各数中欠准位最高的一致。

例 1.2-1 $14.6 \underline{1} + 2.21 \underline{6} + 0.0067 \underline{2} = 16.8 \underline{3272} = 16.8 \underline{3}$

下面加横线的数为欠准数。根据保留一位欠准数原则,计算结果应为16.83,其欠准位与参与加减运算的3个数中欠准位最高的14.61相同。

2) 乘除运算

乘除运算结果的有效位数与参与运算的各数中有效数字位数最少者相同。

例 1.2-2 $4.17 \underline{8} \times 10. \underline{1} = 42. \underline{2978} = 42. \underline{2}$

乘积结果应为3位有效数字,与乘数中有效数字位数最少的10.1的位数相同。

例 1.2-3 $4812 \underline{8} \div 12. \underline{3} = 391. \underline{1} = 39 \underline{1}$

结果应为3位有效数字,与参与运算的各数中有效数字位数最少的12.3位数相同。

3) 乘方、开方

乘方、开方运算结果的有效位数与其底的有效位数相同。

4) 三角函数、对数运算

将自变量末位变化1,与原数产生差异的最高位就是有效数字的末位。

例 1.2-4 $\sin 30^\circ 2' = 0.500 \underline{503748}$, $\sin 30^\circ 3' = 0.500 \underline{755559}$

比较两个结果,差异出现在第四位上,因此取 $\sin 30^\circ 2' = 0.5005$ 。

5) 常数

自然数 1, 2, 3, 4, ... 以及常数 $\pi, \sqrt{2}, \sqrt{3}, \dots$ 等不是测量而得,不存在欠准位,因此可以视为有无穷多位有效数字,书写时不必写出后面的“0”。计算过程中这些常数项参加运算时,所取的位数应比测量数据中位数最少者多取一位,例如 $L = 2\pi R$, 若测量值 $R = 2.35 \times 10^{-2} \text{m}$, 则 π 应取为 3.142。

4. 有效数字的修约规则

根据有效数字的运算规则,为使计算简化,在不影响最后结果应保留的位数(或欠准位置)的前提下,可以在运算前、后对数据进行修约。为使舍入的机会均等,其修约规则是“四舍六入五‘凑偶’”。

例如:3.14159 取 4 位有效数字应为 3.142; 3.51050 取 4 位有效数字应为 3.510; 这两个例子表明:当尾数等于 5 时,若尾数的前一位是偶数,则舍去;若尾数的前一位是奇数,则入凑成偶数。

1.3 测量的不确定度及其评定

一个物理量可以采用不同的方法、不同的仪器或由不同的人员来测,那么如何来评价哪个测量结果更好、更可靠呢? 过去一直用误差作为评价测量结果的指标,但存在两个不足:其一,误差是与真值之差,真值无法确定,从而误差实际上也无法确定;其二,误差给出了误差存在的一个范围(从而也就给出了测量真值存在的范围),但没有给出处在这个范围的可能性,由随机误差的正态分布可知,误差在不同范围的可能性是不同的,从而测量的真值在不同范围的可能性亦不相同,仅仅给出范围是不够的。因此,目前国际上统一采用不确定度作为评价测量结果的指标。

1. 不确定度的基本概念

测量不确定度表征合理地赋予被测量之值的分散性,与测量结果相联系的参数,它表示由于测量误差的存在使得测量结果不能确定的程度,既包括不能确定的范围(这与误差相同),又包括处于这一范围的置信度(这与误差不同)。因此,测量的不确定度可近似地理解为一定概率下的误差范围。

不确定度的评定方法取决于其来源,直接测量量与间接测量量的不确定度的来源不同,评定的方法也不同,下面分别讨论。

2. 直接测量量的不确定度

直接测量量的不确定度来源于测量中的各类误差,按估算方法不同可归结为 A、B 两大分量。由实验中的随机因素引入的不确定度分量称做 A 类不确定度,它可用统计方法处理,又称统计不确定度;由未定系统误差引入的不确定度称做 B 类不确定度,它不能用统计方法处理,又称做非统计不确定度。

1) A 类不确定度

随机变量都服从一定的分布规律。表征随机变量分布的一个重要的特征量是标准差。由数理统计知识,标准差为