



大学物理实验

◎ 代锦辉 杨培林 田荣刚 主编



科学出版社

大学物理实验

主 编 代锦辉 杨培林 田荣刚

副主编 余 华 赵秋瑯 张由群

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书根据教育部高等学校非物理专业物理基础课程教学指导分委员会提出的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》编写而成。

本书系统地介绍了测量和误差、不确定度和数据处理的基本知识,并介绍了物理实验的基本仪器和基本操作技术,按基础性实验、综合性实验和近代物理实验、设计性实验和研究性实验分类,编写了 39 个实验项目,内容包括力学、热学、电磁学、光学和近代物理。

本书可作为高等院校理工类专业大学物理实验课程教材和教学参考书,也可供其他专业相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 代锦辉, 杨培林, 田荣刚主编. —北京: 科学出版社, 2016.1

ISBN 978-7-03-047162-8

I. ①大... II. ①代...②杨... ③田... 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 013580 号

责任编辑: 窦京涛 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 霍 兵 / 封面设计: 华路天然工作室

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>

保定市中国画美凯印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张: 13 1/4

字数: 314 000

定价: 29.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

本书根据教育部高等学校非物理专业物理基础课程教学指导分委员会提出的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，参考多部物理实验教材，并根据物理实验仪器设备发展更新的具体情况，结合实验指导教师多年的教学经验编写而成。本书系统地介绍了测量和误差、不确定度和数据处理的基本知识，并介绍了物理实验的基本仪器和基本操作技术，按基础性实验、综合性实验和近代物理实验、设计性实验和研究性实验分类，编写了 39 个实验项目，内容包括力学、热学、电磁学、光学和近代物理。

本书由代锦辉负责组织工作和整体结构的设计，并编写第 1~3 章、实验 4.1、4.2、4.4、5.1、5.5、5.7、6.1、6.2、6.3 和附录；杨培林编写实验 4.5、4.6、4.7、4.10、5.4、6.5；田荣刚编写实验 4.3、4.15、5.3、5.8、5.9、5.10、5.12、5.16、6.7；余华编写实验 4.11、4.12、4.13、5.2、6.4；赵秋塘编写实验 4.14、5.6、5.11、5.14、5.15、6.6；张由群编写实验 4.8、4.9、5.13、6.8。

由于编者水平有限，本书中难免有缺点和不足之处，真诚欢迎读者批评指正。

编 者

2015 年 10 月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 大学物理实验课程的意义、地位和任务	1
1.2 大学物理实验课的基本教学程序	1
1.3 物理实验室规则	2
1.4 大学物理实验课的考核方式	2
第 2 章 测量不确定度、有效数字与数据处理	3
2.1 测量和误差	3
2.2 测量的不确定度	7
2.3 有效数字	10
2.4 测量结果的表示	14
2.5 实验数据的记录和处理方法	15
第 3 章 物理实验预备知识	21
3.1 力学实验预备知识	21
3.2 电磁学实验预备知识	28
3.3 光学实验预备知识	36
3.4 设计性实验预备知识	40
第 4 章 基础性实验	44
实验 4.1 弹性模量的测定	44
实验 4.2 刚体转动惯量的测量	48
实验 4.3 液体黏度系数的测定	51
实验 4.4 电表的改装与校准	55
实验 4.5 导热系数的测定	58
实验 4.6 电势差计	62
实验 4.7 静电场的测绘	72
实验 4.8 惠斯通电桥测电阻	76
实验 4.9 双电桥测低电阻	81
实验 4.10 示波器的原理和使用	84
实验 4.11 分光计的调节与使用	90
实验 4.12 光栅常数的测定	94
实验 4.13 用分光计测三棱镜的折射率	98
实验 4.14 牛顿环和劈尖干涉实验	102
实验 4.15 双棱镜干涉实验	107
第 5 章 综合性实验和近代物理实验	111

实验 5.1	声速的测量	111
实验 5.2	温差电偶实验	114
实验 5.3	空气比热容比的测定	116
实验 5.4	光的偏振	121
实验 5.5	压力传感器基本特性研究与电子秤的设计制作	126
实验 5.6	长直螺线管内轴线上磁场的测量	130
实验 5.7	密立根油滴实验	137
实验 5.8	迈克耳孙干涉仪	143
实验 5.9	光电效应实验	148
实验 5.10	太阳能电池实验	154
实验 5.11	弦振动实验	161
实验 5.12	激光全息照相	166
实验 5.13	光拍法测量光速	169
实验 5.14	硅的霍尔效应及电导率的测量	174
实验 5.15	音频信号光纤传输实验	180
实验 5.16	微波实验技术	189
第 6 章	设计性实验和研究性实验	193
实验 6.1	碰撞打靶	193
实验 6.2	双棱镜干涉实验的研究	194
实验 6.3	电阻测量的设计	194
实验 6.4	电势差计的应用	196
实验 6.5	双踪示波器的应用	198
实验 6.6	测量不规则物体的密度	198
实验 6.7	用冲击法测地磁场强度	199
实验 6.8	微波与光的波动性研究	200
主要参考文献		202
附录	物理学常用数表	203
附录 1	常用物理量的法定计量单位	203
附录 2	基本和重要的物理常数	204
附录 3	20℃时物质的密度	205
附录 4	常温下材料的弹性模量	205
附录 5	20℃时液体的黏度系数	205
附录 6	不同温度时甘油的黏度系数	205
附录 7	20℃时金属的电阻率及其温度系数	205
附录 8	物质的折射率(对 $\lambda_D=589.3\text{nm}$)	205
附录 9	常用光源的谱线波长	206

第1章 绪 论

1.1 大学物理实验课程的意义、地位和任务

科学实验,是人们为实现预定目的,通过人工干预和控制研究对象,让某种自然现象重复出现,使得人们可以反复观察、测量、分析、对比,最后获得结论的过程.物理实验体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面,是其他学科实验的基础.因此,大学物理实验课是学生接受系统实验方法和实验技能培养与训练的开端,是高等学校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程.大学物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、手段,能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力、提高科学素质的重要基础.它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用.

大学物理实验课程的具体任务是:

(1)掌握物理实验的基本知识.学习误差理论和不确定度理论,学习物理量的测量,掌握常用的实验方法,学习数据处理和实验结果的规范表示.

(2)培养自学与独立实验的能力.能够通过阅读实验教材、参考书等有关资料,掌握实验原理及方法,正确使用实验仪器设备,独立完成实验内容,撰写出合格的实验报告.

(3)培养分析与研究的能力.能够运用相关理论知识对实验过程、实验现象和实验结果进行分析、判断、归纳和总结.

(4)培养设计与创新的能力.能够自主设计实验方案、确定测量方法、选择仪器设备和测量条件,完成符合规范要求的设计性或创新性实验.

1.2 大学物理实验课的基本教学程序

不同的实验项目,虽然内容各不相同,但都包含了实验预习、实验进行和实验报告撰写三个程序,学生必须严格遵守.

(1)实验预习.学生应认真阅读实验教材及相关参考书,明确实验目的,掌握原理和方法,知道使用什么仪器,了解实验的操作步骤,并按要求写出预习报告、回答实验预习题.

(2)实验进行.进入实验室后,应阅读黑板上或实验桌上的通知和注意事项,听教师作启发性讲解,了解仪器的使用和保护方法,按要求调整仪器,观察实验现象,测量并记录数据,所有实验数据测完后,必须经教师认可签字,最后整理好仪器设备.

(3)实验报告撰写.实验报告是实验的总结,它在一定程度上体现了实验者的水平和实验成果的质量.

一份规范完整的实验报告包括以下8项不可缺少的内容(含评分标准):

- a. 实验名称.(5分)
- b. 实验目的.(5分)

c. 实验仪器. 写出主要仪器设备及其主要参数. (5 分)

d. 实验原理. 写出本实验主要物理量的测量方法和理论依据, 主要测量公式及其适用条件, 画出实验装置示意图、电路图或光路图. 需要注意的是, 实验原理是在掌握并理解的基础上撰写的, 切勿照抄教材. (20 分)

e. 实验内容与步骤. 简述实验的主要内容和步骤即可, 切勿照抄教材. (5 分)

f. 数据记录及处理. 将原始数据重新整理誊写在报告上, 数据必须准确完整, 不允许修改, 并尽可能列成表格; 根据测量数据计算待测物理量及其测量的不确定度 (应有较详细的计算过程), 按要求作实验曲线图. (35 分)

g. 实验结果表示. 写出实验的最后结果, 应包含有效数表示的待测物理量的数值、不确定度和单位等三个信息. (5 分)

h. 分析与讨论. 内容不限, 可以是实验现象的分析, 实验结果的讨论, 对问题的研究体会, 实验的收获和建议. (20 分)

1.3 物理实验室规则

(1) 学生进入实验室需带上教材和实验原始数据记录纸. 每次实验, 经教师讲解后, 方可进行操作.

(2) 保持清洁安静的实验环境, 遵守课堂纪律, 不无故迟到、缺席、早退. 因特殊原因缺席的实验, 应尽快与指导教师联系补做实验.

(3) 爱护实验仪器设备. 未经许可不得擅自搬动或调动他组仪器, 实验中严格按照要求操作, 若因违反仪器操作规程或不听从教师指导而造成仪器损坏, 需照章赔偿.

(4) 在实验过程中若仪器设备发生故障, 应立即报告指导教师.

(5) 实验数据应如实、完整地记录在“实验原始数据记录纸”上, 不可随意修改.

(6) 实验完毕后, 整理好仪器设备, 将实验桌面收拾整齐, 经教师检查原始数据并签字后离开实验室.

(7) 认真完成实验报告, 并附上有教师签字的原始数据, 按要求及时交实验报告.

1.4 大学物理实验课的考核方式

大学物理实验课程为考试课程. 与一般的理论课程不同, 本课程的考核总成绩由平时成绩和考试成绩构成. 平时成绩占 80%, 包括实验报告、预习、实验操作及考核、回答问题、遵守实验室规则、考勤等; 考试成绩占 20%, 包括期末考试或操作考试.

需要注意的是, 按教学大纲的规定, 缺席 3 次及以上实验项目, 或者缺少 3 个及以上实验报告, 总成绩都记为 0 分, 需要重修本课程.

第2章 测量不确定度、有效数字与数据处理

2.1 测量和误差

2.1.1 测量及其分类

大学物理实验除了定性地观察各种物理现象外,更多的是寻求、确定各物理量之间的内在联系,这就需要对各物理量进行测量.

测量就是将待测物理量与一个选作标准的同类物理量(量具或仪器设备)进行比较的过程,从而找出待测量是标准量的多少倍.测量的结果应包含数值、单位和结果的可信程度(用不确定度表示).

测量可分为直接测量和间接测量.在测量中,由于使用仪器、采用方法以及测量者的不同,测量又可分为等精度测量和不等精度测量.

1. 直接测量和间接测量

直接测量就是把待测量和标准量直接进行比较,从而得到所需结果,如用米尺测量书的长度、用停表测量时间、用电流表测量电流等.

间接测量就是先通过直接测量得到若干物理量的值,然后利用这些值并通过一定的函数关系(测量公式)求出所需结果.例如,测量实验室的面积,可通过先直接测量出实验室的“长”和“宽”,再通过计算求出面积,面积这个结果就是通过间接测量得到的;又如,通过单摆测量重力加速度,就是先直接测出振动周期 T 和摆长 l ,然后利用函数关系 $g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$ 求出重力加速度 g .大学物理实验中,同学们在实验室所进行的测量大多数是直接测量,而每个实验最后所需要得到的结果几乎都是通过间接测量获得的.

2. 等精度测量和不等精度测量

等精度测量是在相同条件下对某一物理量进行的一系列测量.例如,同一测量者使用同一仪器、采用同一种方法对同一物理量 x 进行连续多次测量,尽管各次测量值 x_i 可能不相等,但可靠程度却相同.

不等精度测量是在不同的条件下对某一物理量进行的一系列测量.例如,不同的测量者使用不同的仪器、采用不同的方法对物理量 y 进行若干次测量,则各次测量值 y_i 的可靠程度不相同.

在不等精度测量中,由于各测量值的可靠程度不一样,因此在计算测量结果时,需要根据各测量值的“权重”进行“加权平均”.但本书的绝大多数实验一般都采用等精度测量,所以后面所介绍的数据处理、误差或不确定度计算与分析都是针对等精度测量而言.

2.1.2 测量误差

由于测量过程中各种因素的影响, 任何测量都不可能绝对精确, 即测量结果与被测量物理量的客观存在值之间总存在着偏差, 这就是测量误差.

1. 真值与误差

真值是一个物理量在一定条件下的客观真实值. 由于实验方法、实验条件、实验仪器以及人的观察能力等因素的限制, 真值是不可能得到的, 它是一个理想的概念. 我们测量得到的结果仅是待测量的近似值. 误差即定义为测量值与真值之差.

设物理量的真值为 μ , 测量值为 x , 按定义误差 Δx 则为

$$\Delta x = x - \mu \quad (2-1-1)$$

2. 最佳值(算术平均值)与偏差

由于真值无法得到, 在实际测量中常用约定真值来代替真值. 算术平均值、满足规定的准确度量值、计量器所复现的标准量值、公认值、理论值等都可以作为约定真值. 而在物理实验中, 常用多次测量值的算术平均值作为测量的约定真值, 也叫测量的最佳值.

设对某一物理量 x 进行 n 次等精度测量, 得到一系列测量值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$, 则测量结果的最佳值(算术平均值) $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-1-2)$$

而偏差 ν_i 则定义为测量值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 之差, 即

$$\nu_i = x_i - \bar{x} \quad (2-1-3)$$

可见, 误差和偏差是有区别的, 但可以证明, 当测量次数很大时, 偏差接近误差.

3. 绝对误差与相对误差

如上所述, 我们定义了测量值 x 的误差 Δx , 有时也把 Δx 叫做绝对误差. 评价一个测量结果的准确程度, 不但要看绝对误差 Δx 的大小, 还要看相对误差的大小. 相对误差的定义为

$$E(x) = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (2-1-4)$$

由于 Δx 无法得到, 实际计算时常用偏差 ν_i 代替.

2.1.3 误差及其分类

误差的产生有多方面的因素. 根据误差的性质和产生的原因, 一般把误差分为三类: 系统误差、偶然误差(也称为随机误差)、粗大误差.

1. 系统误差

系统误差是指在同一条件下多次测量同一物理量时, 误差的大小和符号都保持不变, 或当条件改变时, 误差按某一确定的已知规律变化的误差。

系统误差产生的原因主要有以下几个方面:

(1) 仪器方面: 由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用所带来的误差, 如天平不等臂、螺旋有空程差。

(2) 理论方面: 由于测量所依据的理论的近似性、测量方法和测量条件与理论要求有出入而带来的误差。例如, 伏安法测量电阻时, 没有考虑电表内阻的影响; 称质量轻而体积大的物体时, 忽略了空气浮力的影响。

(3) 人员方面: 由于测量者本人生理或心理特点所带来的误差。例如, 左右手习惯不同; 远近、色彩视力差异; 反应的迟缓。

可见, 系统误差有其规律性, 并且可以通过实验方案的优化、参数的设计、测量条件的控制、仪器精度的选择、测量结果的修正等方面来减小或消除它, 但这对实验者的设计能力、实验能力、研究能力等都有较高的要求。实验者应在实验中不断总结经验, 提高实验素养, 逐步尽可能地减小系统误差。

2. 偶然误差

偶然误差是指在同一条件下多次测量同一物理量时, 即使系统误差已经全部消除, 仍然存在误差, 而且误差时大时小, 时正时负, 不可预知也无法控制, 这种误差称为偶然误差。

偶然误差产生的原因主要有:

(1) 判断的起伏。许多仪器需要对最小分度值以下作估计, 而测量者的估计由于各种原因可能不断改变。

(2) 涨落的影响。例如, 实验时温度、湿度、压强、电源电动势等的微小变化。

(3) 外界干扰。例如, 测量时外界的振动、热、声、光的干扰。

(4) 被测量物体本身的不确定性。例如, 钢丝直径的不均匀性。

虽然对于每次测量来说, 偶然误差的出现是没有规律的, 也是不可预知的, 但是如果测量次数足够多, 就可以发现偶然误差服从一定的统计规律, 即各种大小、符号的偶然误差的出现有确定的概率。在大多数情况下, 偶然误差服从正态(高斯)分布。如图 2-1-1 所示, 横坐标表示偶然误差 δ , 纵坐标表示对应的误差出现的概念密度 $f(\delta)$ 。根据误差理论, 偶然误差 δ 的高斯分布函数为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma(\delta)\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\delta}{\sigma(\delta)}\right]^2\right\} \quad (2-1-5)$$

或

$$f(x) = \frac{1}{\sigma(x)\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-\mu}{\sigma(x)}\right]^2\right\} \quad (2-1-6)$$

其中

$$\delta_i = \Delta x_i = x_i - \mu \quad (2-1-7)$$

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (2-1-8)$$

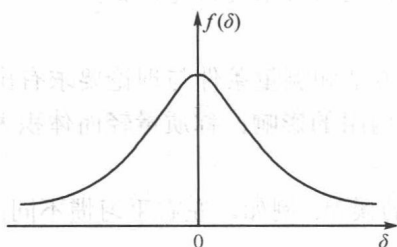


图 2-1-1

其中, x_i 为测量值; δ_i 为测量值的偶然误差; σ 为与真值 μ 有关的数值, 称为标准差, 是表征测量分散性的一个重要参量. σ 和 μ 作为高斯分布的两个参数, 决定了分布的位置和形态.

由高斯分布函数及其曲线可知, 偶然误差服从以下的统计规律:

- (1) 对称性. 绝对值相等的正负误差出现的概率相等;
- (2) 单峰性. 绝对值小的误差出现的概率大, 绝对值大的误差出现的概率小;
- (3) 有限性. 在一定测量条件下, 偶然误差的绝对值不会超过一定的界限;
- (4) 抵偿性. 随着测量次数的增多, 偶然误差的算术平均值趋近于零.

测量中的偶然误差是不可避免的, 但我们根据它的统计规律知道, 采用多次测量可以减小偶然误差的影响, 可以对偶然误差进行合理的估计.

3. 粗大误差

粗大误差也称为过失误差, 是指明显超出规定条件下所预期的误差. 在测量过程中, 一些不正常的因素的影响常会带来这种误差, 如外界条件的突变、测量时的粗心大意、测量仪器的损坏等. 含有粗大误差的测量值称为“粗大值”或“坏值”, 应该剔除.

2.1.4 测量结果的准确度(正确度)、精密度、精确度

在评价测量结果时, 常定性地用到准确度(正确度)、精密度、精确度三个概念, 它们的含义不同, 使用时应加以区别.

(1) 准确度(正确度). 指测量值或实验所得结果与真值符合的程度, 是反映系统误差大小的量. 准确度高, 系统误差小; 准确度低, 系统误差大. 在用准确度描述测量结果时, 偶然误差的大小不明确.

(2) 精密度. 指重复测量结果相反接近的程度, 是反映偶然误差大小的量. 精密度高, 测量值集中, 偶然误差小; 精密度低, 测量值分散, 偶然误差大. 在用精密度描述测量结果时, 系统误差的大小不明确.

(3) 精确度. 综合反映系统误差和偶然误差的大小. 精确度高, 表示系统误差和偶然误差都小.

如图 2-1-2 所示, 用打靶时子弹打在靶上的分布来说明准确度(正确度)、精密度、精确度这三个概念.



图 2-1-2

2.2 测量的不确定度

2.2.1 不确定度的概念

科学实验的测量结果，不但要给出测量所得的值，而且需要评定测得值的可靠程度。由于误差评价实验结果的局限性，为了更准确地评价实验结果的可信赖程度，提出了采用不确定度的建议和规定。

所谓的不确定度(uncertainty)，是对被测量的真值所处的量值范围的评定；或者说，由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度，是被测量真值在某个量值范围的评定。可见，不确定度反映了测量结果的可信赖程度的高低。不确定度小，说明在相同的可能性下，包含真值的那个范围小，测量结果可信赖的程度高；反之则低。

计算不确定度的大小时，不用区分偶然误差和系统误差，而是将不确定度分为采用统计方法计算的 A 类不确定度 u_A 和采用其他方法估算的 B 类不确定度 u_B 。测量结果的总不确定度 σ ，用方差合成求出

$$\sigma = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (2-2-1)$$

2.2.2 直接测量的标准不确定度

1. A 类不确定度 u_A

对多次重复测量值 x ，其 A 类不确定度 $u_A(x)$ 用其平均值的标准偏差 $s_{\bar{x}}$ 来表征，即

$$u_A(x) = s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-2-2)$$

其中， n 为测量次数。

2. B类不确定度 u_B

根据经验和其他各种信息进行估计, 用非统计方法估算的那些影响测量结果的误差分量, 都可归为 B 类不确定度. 本课程中, 可以只考虑测量 x 时所用仪器的仪器误差这一主要部分, 即:

当单次测量时

$$u_B(x) = \Delta_{\text{ins}} \quad (2-2-3)$$

当多次测量时

$$u_B(x) = \frac{\Delta_{\text{ins}}}{\sqrt{3}} \quad (2-2-4)$$

其中, Δ_{ins} 是仪器误差, 可由国家颁布的标准、仪器说明书、仪器的等级、仪器的最小分度值等获得.

3. 总不确定度 $\sigma(x)$

直接测量值 x 的总标准不确定度, 由 A 类不确定度 u_A 和 B 类不确定度 u_B 合成, 即

$$\sigma(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (2-2-5)$$

2.2.3 间接测量的不确定度

间接测量值的不确定度由不确定度传递公式求出.

若直接测量量 $x, y, z, \dots$ 是彼此独立的物理量, 间接测量量 w 是 $x, y, z, \dots$ 的函数, 即

$$w = f(x, y, z, \dots) \quad (2-2-6)$$

则间接测量物理量 w 的不确定度 $\sigma(w)$ 和相对不确定度 $E(w)$ 分别为

$$\sigma(w) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma^2(x) + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma^2(y) + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sigma^2(z) + \dots} \quad (2-2-7)$$

$$E(w) = \frac{\sigma(w)}{w} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 \sigma^2(x) + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 \sigma^2(y) + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\right)^2 \sigma^2(z) + \dots} \quad (2-2-8)$$

式中, $\sigma(x), \sigma(y), \sigma(z), \dots$ 分别是直接测量量 $x, y, z, \dots$ 的不确定度. 在实际计算时, 有时为计算方便, 常先求相对不确定度 $E(w)$, 再由相对不确定度 $E(w)$ 求出标准不确定度 $\sigma(w)$. 表 2-2-1 给出了一些常用函数的不确定度传递公式, 供计算时使用.

表 2-2-1 一些常用函数的不确定度传递公式

函数关系	不确定度传递公式
$w = x + y$	$\sigma(w) = \sqrt{\sigma^2(x) + \sigma^2(y)}$
$w = k \cdot x$	$\sigma(w) = k \cdot \sigma(x)$

续表

函数关系	不确定度传递公式
$w = x \cdot y$ 或 $w = \frac{x}{y}$	$\frac{\sigma(w)}{w} = \sqrt{\left(\frac{\sigma(x)}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(y)}{y}\right)^2}$
$w = \frac{x^p \cdot y^q}{z^r}$	$\frac{\sigma(w)}{w} = \sqrt{\left(\frac{p\sigma(x)}{x}\right)^2 + \left(\frac{q\sigma(y)}{y}\right)^2 + \left(\frac{r\sigma(z)}{z}\right)^2}$
$w = \sqrt[p]{x}$	$\frac{\sigma(w)}{w} = \frac{1}{p} \cdot \frac{\sigma(x)}{x}$
$w = \sin x$	$\sigma(w) = \cos x \cdot \sigma(x)$
$w = \ln x$	$\sigma(w) = \frac{1}{x} \cdot \sigma(x)$

2.2.4 不确定度的均分原理和不确定度传递公式的应用

在测量中，每个直接被测物理量的不确定度都会对间接测量量的不确定度有贡献。我们可以根据不确定度传递公式，将间接测量物理量的不确定度均匀分配到各个直接被测分量中，使得各个被测分量的不确定度对最后间接测量物理量的不确定度的贡献相等，这就是不确定度的均分原理。不确定度的均分原理，在分析各物理量的测量方法、选择测量仪器、确定测量条件、寻找改进实验途径等方面都有重要的指导作用。

例如，由 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ ，用单摆测量重力加速度，若要求其测量的相对不确定度不超过 0.5%，则可根据不确定度传递公式和不确定度均分原理，选择测量器具和确定实验条件。首先可推出其相对不确定度传递公式为

$$\frac{\sigma(g)}{g} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(2\frac{\sigma_T}{T}\right)^2}$$

现要求是

$$\frac{\sigma(g)}{g} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(2\frac{\sigma_T}{T}\right)^2} \leq 0.5\%$$

即

$$\left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(2\frac{\sigma_T}{T}\right)^2 \leq (0.5\%)^2$$

按上述不确定度均分原理，有

$$\left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 = \left(2\frac{\sigma_T}{T}\right)^2 \leq \frac{1}{2}(0.5\%)^2$$

即

$$\frac{\sigma_l}{l} = 2\frac{\sigma_T}{T} = \frac{\sqrt{2}}{2} \times 0.5\%$$

则要求控制各个分量的不确定度分别为

$$\sigma_l \leq l \cdot 0.4\% \quad (2-2-9)$$

$$\sigma_T \leq T \cdot 0.2\% \quad (2-2-10)$$

可根据 σ_l 和 σ_T 选择测摆长 l 和周期 T 的量具.

对于摆长 l 的测量, l 一般大约为 1m , 则由式 (2-2-9) 可得其不确定度要求为

$$\sigma_l \leq l \cdot 0.4\% \leq 4\text{mm}$$

若选常见的最小分度值为 1mm 的米尺, 则由其仪器误差带来的不确定度为

$$\sigma'_l = \Delta_{\text{ins}} = 0.5 \leq 4\text{mm}$$

可见用这种分度值为 1mm 的米尺测量摆长 l 可满足设计要求.

对于周期 T 的测量, T 一般约为 2s , 则由式 (2-2-10) 可得其不确定度要求为

$$\sigma_T \leq T \cdot 0.2\% \leq 0.004\text{s}$$

一般常用秒表的最小分度值为 0.1s , 由其仪器误差所带来的不确定度为

$$\sigma'_T = 0.1 \geq 0.004\text{s}$$

不能满足测量所要求的不确定度.

但如果我们每次测量不是测一个周期的时间, 而是测量 50 个周期的时间, 即每次测量的时间为

$$t = 50T$$

则有

$$\sigma''_T = \frac{\sigma_l}{50} = \frac{0.1}{50} = 0.002\text{s} \leq 0.004\text{s}$$

满足不确定度的要求. 可见, 当确定适当的测量条件时 (即测量 50 个周期的时间), 可达到符合实验设计的要求.

2.3 有效数字

在实验中, 我们对物理量进行测量, 测量的数据有误差, 因此测量数据的表示应与误差联系起来, 这需要用有效数字来表示测量数据.

2.3.1 有效数字的定义

我们用米尺测量一木块的长度 L , 如图 2-3-1 所示. 测量数据是 $L=4.63\text{cm}$, 个位上的 4 和十分位上的 6 是准确读出的, 称为可靠数字; 百分位上的 3 是估读的, 或者说是有误差的, 称为可疑数字.

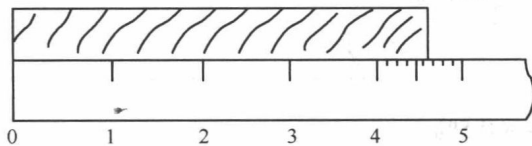


图 2-3-1 米尺测量木块的长度

我们定义, 测量数据中, 从第一位非零的可靠数字算起, 到最后一位可疑数字 (包含可疑数字) 为止, 都统称为有效数字.

例如, 前面的 $L=4.63\text{cm}$, 有 3 位有效数字; $U=24.05\text{mV}$ 有 4 位有效数字, 百分位上的

5 是可疑数字, 其他三位 2、4、0 是可靠数字; $H=0.310\text{m}$ 有 3 位有效数字, 千分位上的 0 是可疑数字, 从前面第一位非零的 3 算起有 2 位可靠数字, 即 3 和 1.

使用有效数字必须注意以下几点:

(1) 在任何一个测量数据中, 一般只保留 1 位可疑数字, 它就是误差所在位.

(2) 测量数据中间的零和后面的零都是有效数字, 因此测量数据和数学上的数是不同的. 比如, 在数学上 $35.20\text{kg}=35.2\text{kg}$, 而在测量中, 35.20kg 就不能写成 35.2kg .

(3) 有效数字位数的多少反映测量数据准确度的高低. 同一物理量的测量中, 有效数字的位数越多, 反映测量数据的准确度越高, 误差越小. 例如, 上面的 35.20kg , 这个数据的误差在百分位上, 而 35.2kg 这个数据的误差在十分位上, 因此 35.20kg 的误差就比 35.2kg 的误差小, 也就是说, 35.20kg 的准确度要高于 35.2kg . 所以, 有效数字的位数不能随意改变.

(4) 测量数据变换单位时或小数点位置变化时, 有效数字的位数保持不变. 比如, $4.63\text{cm}=0.0463\text{m}=0.0000463\text{km}$, 改变了单位, 但仍是 3 位有效数字.

(5) 对于较大或较小的数据, 常用 $\times 10^{\pm n}$ (n 为正整数) 表示, 这种表示方法称为科学记数法. 用科学记数法表示时, 小数点前面一般只写一位非零数字. 例如, 前面的 $0.0000463\text{km}=4.63 \times 10^{-5}\text{km}$.

2.3.2 数字的舍入规则

一个测量数据的有效数字位数一旦确定了, 其他多余的位数就要进行合理的取舍, 较为合理的数字舍入规则是:

(1) 测量数据的舍入规则. 若以保留数字的末位为单位, 尾数大于 0.5 的, 末位加 1; 小于 0.5 的, 末位不变; 等于 0.5 的, 则在末位为奇时加 1 (进入), 偶数时不变 (舍去).

例 2-1 $\pi=3.14159$

取 5 位有效数字时, 尾数为 $0.9 > 0.5$, $\pi=3.1416$;

取 4 位有效数字时, 尾数为 $0.59 > 0.5$, $\pi=3.142$;

取 3 位有效数字时, 尾数为 $0.159 < 0.5$, $\pi=3.14$.

例 2-2 下面的数据都取 3 位有效数字.

$L_1=4.95500\text{cm}=4.96\text{cm}$

$L_2=4.94500\text{cm}=4.94\text{cm}$

$L_3=4.94501\text{cm}=4.95\text{cm}$

(2) 不确定度的舍入规则. 不确定度通常只取一位, 从最坏的情况 (不确定度最大值) 考虑, 尾数只进不舍. 例如, $\sigma_\eta=0.0512\text{Pa}\cdot\text{s}$, 应取 $\sigma_\eta=0.06\text{Pa}\cdot\text{s}$. 相对不确定度通常取两位.

2.3.3 直接测量的有效数字

1. 仪器的读数规则

用量具或仪表直接测量时, 读数应保留几位有效数字? 这必须根据仪器误差来决定. 通常仪器的读数规则是: 估读至仪器误差 (只取一位) 所在位. 例如, 一只量程为 100mA , 准确