

普通高等教育公共基础课系列“十三五”规划教材

DAXUE
WULI
SHIYAN

主编◎王 瑞

大学 物理实验



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

非外借

普通高等教育公共基础课系列“十三五”规划教材

大学 物理实验

主 编 王 瑞
副主编 谢思思 邓三星
杨少沛 翟志锦
编 委 董文泽 秦飞跃
郭 涛



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书分5章,内容包括测量误差与数据处理、力学和热学实验、电磁学实验、光学实验、近代物理实验等。

本书可作为高等院校物理学及相关课程的教材,也可供对物理实验感兴趣的读者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/王瑞主编. —上海:上海交通大学出版社, 2018

ISBN 978-7-313-19684-2

I. ①大… II. ①王… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第155826号

大学物理实验

主 编: 王 瑞

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 谈 毅

印 制: 三河市越阳印务有限公司

开 本: 787×1092mm 1/16

字 数: 288千字

版 次: 2018年7月第1版

书 号: ISBN 978-7-313-19684-2/

定 价: 42.80元

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 010-61370827

地 址: 上海市番禺路951号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 16.25

印 次: 2018年7月第1次印刷

大学物理实验是对高等学校理工科学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修课程, 是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端。作为基础实验课, 它既能让学生学习科学实验的基础知识, 掌握科学研究的基本方法, 观察实验中的各种现象, 提高学生进行独立工作的能力, 又能使学生在实验方法的设计、测量仪器的选择、测量条件的确定等方面受到训练, 并亲身感受理论是如何联系实际的。

本书是根据高等学校物理实验课程教学基本要求, 结合编者近年来的实验教学经验, 体现因材施教的大学物理实验教材。本书特点: ①以素质教育为目标, 建立系统的力、热、光、电磁、近代物理实验教学体系。物理实验课程与大学物理课程紧密结合, 理论联系实际, 融知识传授、能力培养、素质教育于一体; ②作为基础实践课程, 我们对物理实验从教学内容、教学手段、教学方式等方面进行了改革探索和实践, 实验项目紧贴学校的实验仪器实际情况, 使学生没有陌生感; ③本教材实验以基础性实验和验证性实验为主, 侧重于基本训练方面, 加深学生对基本原理和方法的学习和理解, 易于学生自学。

全书分 5 章, 内容包括测量误差与数据处理、力学和热学实验、电磁学实验、光学实验、近代物理学实验, 涉及具体实验 43 个, 可作为普通高等院校理工类非物理专业的大学物理实验课的教材或参考书。

本书由黄河交通学院王瑞老师任主编, 黄河交通学院谢思思老师任副主编, 并由谢思思老师对全书进行统稿工作。编写分工如下: 黄河交通学院王瑞老师编写绪论、实验 2.1~2.9、2.11、2.12、2.14、3.4、3.5、3.11~3.15、5.6, 黄河交通学院谢思思老师编写第 1 章, 实验 3.3、3.7、3.9、5.5, 黄河交通学院邓三星老师编写实验 2.10, 2.13, 3.1~3.3, 黄河交通学院杨少沛老师编写 3.6、3.8、3.10、4.7、4.8, 黄河交通学院翟桔锦老师编写 4.1~4.6, 黄河交通学院董文泽老师编写实验 5.1~5.4, 附录部分由黄河交通学院秦飞跃老师负责整理并进行文字校正, 全书由黄河交通学院郭涛老师负责修改和定稿。

在本书的编写过程中, 我们参考了一些物理实验的教材, 在此向相关教材的作者表示衷心的感谢。由于编者水平有限, 书中存在的错误和疏漏之处, 恳请读者批评指正。

CONTENTS

目 录

绪论	1
0.1 物理实验课的意义	1
0.2 学习实验课的目的	1
0.3 课程的基本要求	2
0.4 基本教学程序	2
第 1 章 测量误差与数据处理	4
1.1 测量与误差	4
1.2 测量不确定度与测量结果的表示	7
1.3 有效数字	10
1.4 实验数据常用处理方法	12
1.5 常用实验方法	16
1.6 问题与分析	20
第 2 章 力学和热学实验	22
2.1 长度和密度的测量	22
2.2 单摆法测量重力加速度	29
2.3 静、动摩擦因数的测量	33
2.4 刚体转动惯量的测定	38
2.5 气垫导轨实验	42
2.6 金属杨氏模量的测定(拉伸法)	49
2.7 落球法测量液体的黏滞系数	52
2.8 液体表面张力系数的测定	57
2.9 空气中声波(可闻声)波长的测定	60
2.10 空气中声速(超声波)的测量	64
2.11 音叉的受迫振动与共振实验	69
2.12 冷却法测量金属的比热容	74
2.13 导热系数的测量	78
2.14 混合法测量冰的熔化热	83
第 3 章 电磁学实验	89
3.1 电表的改装与校准	89



3.2	惠斯通电桥测电阻	95
3.3	开尔文测低值电阻	99
3.4	RLC 电路特性的研究	102
3.5	电阻元件伏安特性实验	114
3.6	电子束的偏转	121
3.7	电子束的聚焦	126
3.8	静电场的描绘	130
3.9	铁磁材料动态磁滞回线的测量	136
3.10	示波器的原理和应用	144
3.11	磁场的测量	152
3.12	霍尔效应原理和霍尔法测量磁场	159
3.13	用电子式冲击电流计测互感	165
3.14	线式电位差计测电动势	168
3.15	光敏电阻的光电特性	171
第 4 章	光学实验	175
4.1	薄透镜焦距的测定	175
4.2	偏振光旋光实验综合仪	180
4.3	牛顿环测量透镜的曲率半径	187
4.4	光栅衍射	191
4.5	迈克尔逊干涉仪的调整和使用	194
4.6	双棱镜测定光波波长	198
4.7	分光计的调节和使用 (1)	202
4.8	分光计的调节和使用 (2)	209
第 5 章	近代物理实验	212
5.1	密立根油滴实验	212
5.2	光电效应和普朗克常量的测定	217
5.3	拉曼光谱	222
5.4	塞曼效应	231
5.5	夫兰克-赫兹实验	239
5.6	黑体红外辐射实验	243
附 录	248
附录 A	中华人民共和国法定计量单位	248
附录 B	常用物理基本常数	251
附录 C	常用仪器的允差	252
参考文献	254

绪 论

0.1 物理实验课的意义

科学实验是人们根据研究的目的,运用科学仪器,人为地控制、创造或纯化某种自然过程,使之按预期的进程发展,同时在尽可能减少干扰的情况下进行定性的或定量的观测,以探求该自然过程变化规律的一种科学活动。

物理学是一门以实验为基础的自然科学学科,物理概念的建立,物理规律的发现,物理学的基本定律,如牛顿运动定律、动量守恒定律、库仑定律、法拉第电磁感应定律等,都是在大量实验的基础上总结出来的,物理实验在物理学的产生、发展和应用过程中起着重要作用。

大学物理实验是对高等学校理工科学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程,是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端,是对理工科专业学生进行科学实验训练的重要基础。

大学物理实验是培养学生实践技能的基础课,通过本课程的学习,可以加深学生对有关物理知识的理解,培养学生正确的科学实验习惯,提高学生的动手能力、观察分析能力和创新能力。物理实验的方法、思想、仪器和技术已经被普遍地应用在自然科学和技术部门的各个领域。因此,作为基础实验课,它既能让学生学习科学实验的基础知识,掌握科学研究的基本方法,观察实验中的各种现象,提高学生进行独立工作的能力,又能使学生在实验方法的设计、测量仪器的选择、测量条件的确定等方面受到训练,并亲身感受理论是如何联系实际的。

0.2 学习实验课的目的

0.2.1 学习物理实验知识,加深对物理学原理的理解

通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习并掌握物理实验的基本知



识、基本方法和基本技能，并加深对物理学原理的理解。

0.2.2 培养与提高学生的科学实验能力

实验课可以培养学生实验预习中的自学能力；实验操作中的动手能力，分析解决问题能力，安装调试仪器能力，排除故障能力；实验总结中的文字表达能力，归纳综合能力，绘图制图能力，处理数据能力；设计实验中的设计创新能力，科学想象能力等。

0.2.3 培养与提高学生的科学素养

实验课可以培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风，严谨踏实、认真细致的工作态度，守纪遵规、爱护公物的良好品格，善于思考、主动探究的钻研精神等，这些科学素养都将为以后从事各类科研活动打下良好基础。

0.3 课程的基本要求

- (1) 能够自行完成预习、进行实验和撰写报告。
- (2) 能够调整实验装置，并基本掌握常用的操作技术。
- (3) 了解物理实验中常用的实验方法和测量方法。
- (4) 能够进行常用物理量的一般测量。
- (5) 了解常用仪器的性能，并学会使用方法。

0.4 基本教学程序

0.4.1 实验前的预习

(1) 阅读教材和有关资料。实验教材是实验的指导参考，它对每一个实验目的、要求、实验原理都进行了详细的阐述，因此，在上实验课前必须认真阅读，并查阅有关参考资料。实验中涉及的仪器，有的读者可能是第一次使用，在预习时就需认真阅读讲义中的仪器介绍，弄清仪器的原理、构造、操作规程和注意事项等，特别是注意事项，不仅要看，还要牢记，否则会造成仪器损坏，甚至人身事故。对仪器的构造，应尽可能地去理解、去想象，必要时还需要去实验室观察实物。

(2) 写好预习报告。在预习的基础上，写好预习报告，其内容包括：①实验名称；②实验目的；③实验原理；④实验仪器。

此外，根据实验内容，准备好实验中所需的绘图工具和计算器等。



0.4.2 实验操作

- (1) 遵守实验室规则。
- (2) 了解实验仪器的使用及注意事项。
- (3) 仔细观察和认真分析实验现象。
- (4) 如实记录实验数据和现象（用钢笔或圆珠笔记录数据，原始数据不得改动）。
- (5) 实验后整理仪器，关好电源、灯、门窗。

0.4.3 实验报告的书写

实验报告是实验收获和结果的书面总结，要求文字通顺、字迹工整、数据完备、图表规范、结果合理。实验报告的内容包括以下几个方面：

- (1) 实验名称（写清楚实验日期）。
- (2) 实验目的。
- (3) 实验原理。实验原理应在理解教材内容的基础上用自己的语言来阐述，做到简明扼要。
- (4) 主要实验仪器设备。
- (5) 实验步骤。实验步骤只需要写出实验步骤要点及关键性的仪器调整方法和测量技巧。
- (6) 实验数据表格、数据处理计算主要过程、作图及实验结果和结论。数据处理要列出实验数据表格，写出数据处理计算的主要过程，作图，给出实验结论。
- (7) 实验现象和结果的分析与讨论、误差分析。对实验现象、结果和实验误差的讨论与分析要具体深入、有见解，其内容可以是对实验现象、结果和误差进行分析，也可以对实验方案提出改进意见。

第 1 章 测量误差与数据处理

1.1 测量与误差

测量是自然科学的组成部分，也是发现新物理规律、证明新物理理论、研究新物质材料、发明新器具装置的必不可少的实践基础。在物理实验中，需要对物理现象状态或过程中各种物理量进行准确测定。由于测量仪器、测量环境、测量方法等因素的限制，测量中的误差是不可避免的，本节内容主要从实验教学的角度，介绍测量及测量误差的基本知识。

1.1.1 测量的基本概念及分类

测量就是把待测物理量与作为计量单位的同类已知量相比较，找出被测量是单位的多少倍的过程。得到的倍数即待测物理量的数值，选做计量标准的物理量称为单位。测量结果应包括数值、单位和不确定度 3 个要素，缺一不可。

1. 根据测量方法分类

(1) 直接测量。用仪器直接测量出被测量的大小的测量过程。如用游标卡尺或螺旋测微计测量物体的长度，用电流表测电流，电压表测电压等，都属于直接测量。

(2) 间接测量。用若干直接测量量代入一定的函数式计算得出的物理量的大小。如测量单摆的摆长 l 和振动周期 T ，由公式 $g = 4\pi^2 l / T^2$ 计算出重力加速度 g 的过程属于间接测量。

2. 根据测量条件分类

(1) 等精度测量。测量条件相同的情况下对同一物理量进行的多次测量。如同一测量者，使用同样的测量仪器及测量方法，在相同的环境下对同一个物理量进行多次测量。其测量结果的可靠性是相同的。

(2) 不等精度测量。在所有测量条件中，只要有一个发生变化，所进行的测量就成为不等精度测量。由于在测量过程中测量条件有变化，变更前后测量结果的可靠性也不相同。



物理实验操作中进行多次测量时,一般采用等精度测量。

1.1.2 测量误差

任何一个物理量在某一时刻和某一位置或某一状态下,都存在一个客观值,这个客观值称为真值。由于测量仪器的准确程度有限,环境条件的影响以及观测者操作读数不能十分准确,任何实验测量都无法得到真值。测量值和真值之间的差异被定义为测量误差,也称绝对误差,简称误差。用 x 表示测量结果, a 表示真值, Δ 表示误差,则有

$$\Delta = x - a \quad (1-1-1)$$

绝对误差不是误差的绝对值,可正可负,它反映了测量值偏离真实值的大小和方向。真值是一个理想化的概念,无法准确测出,因此测量误差的值也无法准确计算。

在实际测量中,一般采用多次测量求平均值,将平均值作为一个最佳值,用 \bar{x} 表示,测量值和最佳值的差值称为偏差,用 Δx 表示,则有

$$\Delta x = x - \bar{x} \quad (1-1-2)$$

为了评价测量结果的可靠程度,引入相对误差的概念,相对误差是绝对误差与真值的比值,一般用百分比来表示。即

$$E = \frac{\Delta}{a} \times 100\% \quad (1-1-3)$$

实际测量时用最佳值代替真值。

1.1.3 误差来源

产生误差的原因有很多,如仪器误差、环境误差、人员误差、方法误差等。根据误差的性质分为系统误差和随机误差两大类。在同一次测量中两类误差同时存在,它们都是测量误差的一个分量。

1. 系统误差

在相同测量条件下多次测量同一物理量时,误差的绝对值和符号保持恒定,或在测量条件改变时,按某一确定规律变化的误差称为系统误差。系统误差是由固定不变的或按确定规律变化的因素造成的,来源主要有以下几个方面:

(1) 仪器误差。任何精密仪器都是有误差的,仪器设计制造过程中会或多或少偏离设计值,或者安装校准不完善产生的误差。如仪器零点不准,天平两端不等臂等。

(2) 方法误差。由于实验原理不够完善或测量所依据的理论近似性所造成的误差。例如伏安法测电阻时,电表的内阻对测量的影响,单摆测重力加速度的公式是一个近似公式。

(3) 环境误差。温度湿度等外界环境对实验仪器的影响引起的误差。

(4) 实验者个人因素。测量者个人的生理特点或固有习惯,操作的超前或滞后引起的误差。



由系统误差定义和系统误差产生原因的分析可以得出其特征为：系统误差产生在测量之前，具有确定性；多次测量不能减弱和消除它，不具有抵偿性。消除系统误差没有通用的方法，应针对其产生的原因采取相应的措施。

2. 随机误差

在相同测量条件下多次测量同一物理量，误差的绝对值和符号随机变化，时大时小，时正时负，以不可预定方式变化，这种误差称为随机误差。当重复测量的次数达到一定数量时，就误差的整体而言，这些误差具有统计规律，其中一种是正态分布（见图 1-1-1），图中以误差值为横坐标，误差值出现的次数为纵坐标。

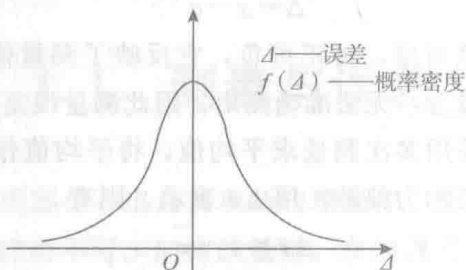


图 1-1-1 随机误差的正态分布

由随机误差的统计规律可得以下性质：

- (1) 单峰性。出现绝对值小的误差概率大，绝对值大的概率小。
- (2) 对称性。绝对值相等的正负误差出现的概率相等。
- (3) 有界性。绝对值很大的误差出现的概率趋近于零。

测量列的随机误差一般用实验标准偏差来估算。标准偏差的计算公式为：

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-1-4)$$

式中， S_x 反映了随机误差的分布特征， S_x 越小表示测量值越集中，随机误差分布范围越窄； n 为测量次数。

1.1.4 误差与测量结果的关系

精密度、准确度、精确度可用来描述测量结果与真值的接近程度。

精密度：重复测量各测量值相互接近的程度。反映了随机误差对测量值的影响，测量值精密度越高，随机误差越小，测量值比较集中，重复性好。

准确度：测量值与真值的接近程度。反映了系统误差对测量值的影响，准确度高表示系统误差小，接近真值的程度高。

精确度：各测量值重复性及测量结果与真值的接近程度。它是随机误差和系统误差的综合反映，测量值的精确度高，则测量结果的随机误差和系统误差都比较小。

精确度是对测量结果随机误差和系统误差的综合评定，因此，测量结果应该用精确度来评定。



1.2 测量不确定度与测量结果的表示

真值是一个理想的概念, 实际测量得到的结果是不准确的, 由误差的定义可知误差的值也无法准确知道。本节讨论一下如何计算误差的可能范围, 即测量的不确定度。

1.2.1 不确定度的概念

不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度, 它表示测量误差可能出现的范围。误差可能是正值, 也可能是负值, 其大小是确定的, 但无法精确知道。不确定度是通过量值范围表示, 表示误差将以一定的概率被包含在量值范围 $(-\sigma \sim +\sigma)$ 或者表示测量值的真值以一定的概率落在量值范围 $(\bar{x}-\sigma) \sim (\bar{x}+\sigma)$ 内, 测量误差在这个范围内取任何值都有一定的可能性, 这个范围可通过某种方法进行计算或评定。即不确定度的大小反映了测量结果和真值之间的靠近的程度, 不确定度实质上是误差的估计值, 是对测量误差的综合评价。

1.2.2 不确定度的分类

不确定度包含了各种不同来源的误差对测量结果的影响, 这些来源不同的不确定度在计算方法上有两类: A类不确定度; B类不确定度。

1. A类不确定度

凡是通过统计方法来计算不确定度的称为 A 类不确定度——统计不确定度。这类不确定度被认为是服从正态分布的, 如随机误差的标准偏差就属于 A 类不确定度。用字母 s 表示。即

$$s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + \cdots + s_m^2} \quad (1-2-1)$$

2. B类不确定度

凡是不能用统计方法计算而只能用其他方法估算的不确定度, 称为 B 类不确定度, 用字母 u 表示。即

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \cdots + u_m^2} \quad (1-2-2)$$

1.2.3 不确定度的计算

1. 直接测量不确定度的计算

对同一个物理量进行 n 次等精度测量, 得到了一个测量列 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$, 这 n 个数据服从正态分布, 测量列的随机误差用实验标准偏差来表示。A 类不确定度为:



$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-2-3)$$

B类不确定度的估计是比较复杂的。它应考虑到影响测量准确度的各种原因，因此 u 通常是多项的。从物理实验教学的实际角度出发，我们通常考虑的因素是仪器误差。在这种情况下，把一些常用仪器的误差限（仪器的最大允许误差） Δ_{ins} 作为直接测量结果的 B 类不确定度。即

$$u = \Delta_{\text{ins}} \quad (1-2-4)$$

仪器误差 Δ_{ins} ，一般仪器上直接标出或给出该仪器的准确度级别，然后算出仪器误差（本书附录 C 给出了常用实验仪器的允差）。如果未注明仪器误差或不清楚时，这样规定：对能连续读数的仪器，取其最小分度值的一半作为仪器误差。如米尺，螺旋测微计等。对不能连续读数的仪器就以最小分度作为仪器误差。

合成不确定度的表征值为：

$$\sigma = \sqrt{s^2 + u^2} \quad (1-2-5)$$

【例 1-1】用 50 分度游标卡尺测一圆环的宽度，其数据如下： $m = 15.272, 15.276, 15.268, 15.274, 15.270, 15.274, 15.286, 15.274, 15.272\text{cm}$ ，求合成不确定度。

解：在计算合成不确定度前先要算出不确定度分量。

由于是多次测量，存在统计不确定度，用贝塞尔公式计算，有

$$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (m_i - \bar{m})^2}{n(n-1)}} = 0.003\text{cm}$$

还存在非统计不确定度（任何直接测量都存在），用估计法计算。把仪器误差 $\Delta_{\text{ins}} = 0.002\text{cm}$ 估计为极限误差，误差分布是均匀的，即

$$u = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.001\text{cm}$$

合成不确定度为：

$$\sigma = \sqrt{S_m^2 + u^2} = \sqrt{(0.003)^2 + (0.001)^2} = 0.003\text{cm}$$

2. 间接测量的不确定度的计算

间接测量值是通过一定函数式由直接测量值计算得到的。直接测量结果的不确定度就会传递给间接测量结果。间接测量的不确定度也可用相应的函数式计算出来。设间接测量列 N 为相互独立的直接测量 x, y, z, \dots 的函数：

$$N = F(x, y, z, \dots) \quad (1-2-6)$$

设 N, x, y, z, \dots 的不确定度分别为 $\sigma, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \dots$ 都是微小的量，相当于数学中的增量，因此间接测量结果的不确定度计算与数学中的全微分公式类似，考虑到不确定度合成的统计性质，再采用方和根合成方式就有：



$$\frac{\sigma}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots} \quad (1-2-7)$$

式(1-2-7)适用积、商形式的函数关系:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots} \quad (1-2-8)$$

式(1-2-8)适用和、差形式的函数关系。

1.2.4 用总不确定度表示测量结果

1. 直接测量结果的表示

若用不确定度表征测量结果的可靠程度,则测量结果可以写成:

$$\begin{aligned} x &= \bar{x} \pm \sigma \quad (\text{单位}) \\ \sigma_r &= \frac{\sigma}{x} \times 100\% \end{aligned} \quad (1-2-9)$$

式中, σ_r 为相对不确定度。这里不确定度由式(1-2-5)计算。

【例 1-2】将【例 1-1】的测量结果正确表示出来。

$$\bar{m} = 15.274 \text{ cm}, \quad \sigma = 0.003 \text{ cm}$$

解:

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{m} = 0.000196$$

$$\text{结果为} \begin{cases} m = (15.274 \pm 0.003) \text{ cm}, \\ \sigma_r = 0.02\% \end{cases}$$

2. 间接测量结果的表示

间接测量结果的表示与直接测量结果形式相同,需要先计算出各直接测量列的不确定度,再根据式(1-2-8)计算出间接测量不确定度,最终的结果表示为:

$$\begin{aligned} N &= \bar{N} \pm \sigma \quad (\text{单位}) \\ \sigma_r &= \frac{\sigma}{N} \times 100\% \end{aligned} \quad (1-2-10)$$

【例 1-3】用单摆测定重力加速度的公式为 $g = 4\pi^2 l / T^2$, 测得的 $T = (2.000 \pm 0.002) \text{ s}$, $l = (100.0 \pm 0.1) \text{ cm}$, 计算重力加速度 g 及相对不确定度 σ_{rg} 。

$$\text{解:} \quad \sigma_{rT} = \frac{0.002}{2.000} = 0.1\% \quad \sigma_{rl} = \frac{0.1}{100.0} = 0.1\%$$

$$\sigma_{rg} = \sqrt{\sigma_l^2 + 4\sigma_T^2} = 0.002236$$

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} = 987.2 \text{ cm/s}^2$$

$$\sigma_g = \sigma_{rg} \times g = 2.2 \text{ cm/s}^2$$



$$\text{结果为} \begin{cases} g = (987.2 \pm 2.2) \text{ cm/s}^2, \\ \sigma_{rg} = 0.22\% . \end{cases}$$

学生在日常物理实验报告中的测量结果应按照以上标准结果形式表示，测量结果包括平均值，不确定度和单位。不确定度只保留一位或者两位有效数字，测量值的平均值最后一位，一定要与不确定度所取位一致。

1.3 有效数字

物理实验中经常要记录很多测量数据，因为测量误差的存在，记录的数据准确度都是有限的，只能以某一近似值表示，间接测量结果还需要进行运算得出。记录数据时应该取几位，运算后应该保留几位，这就与有效数字及其运算法则有关。

1.3.1 有效数字的概念

记录测量数据时，测量结果中可靠的所有数字加上最后有误差的一位数字合起来称为有效数字。例如，用最小分度值为 1mm 的米尺测量物体的长度，读数值为 15.63cm。前面的准确数字 15.6 称为可靠数字，最后一位有误差的数字 3 称为可疑数字，实际上可能不是 3，虽然不准确，但是近似地反映出这一位大小的信息，因此可以认为有效数字是不确定度的一种粗略的表示方法，而不确定度是对有效数字中最后一位（或两位数字）不确定程度的定量描述。有效数字位数的多少反映测量的准确程度，有效数字位数越多，则相对误差越小，测量的准确度越高。因此实验记录有效位数的选取必须准确，既不能多取，也不能少取。

在记录实验数据时，在给出不确定度时，测量结果的有效数字应根据不确定度来决定。本门课程中，一般不确定度只取一位有效数字，测量结果的取位应该与不确定度对齐。所以测量结果的数字的取舍应使测量数字的最后一位（即可疑数字位）正好与不确定度的非零数字位对齐。有效数字的位数与十进制单位的变换无关，即与小数点的位置无关。因此，用以表示小数点位置的 0 不是有效数字。当 0 不是用作表示小数点位置时，0 和其他数字具有同等地位，都是有效数字。显然，在有效数字的位数确定时，第一个不为 0 的数字左面的 0 不能算有效数字的位数，而第一个不为 0 的数字右面的 0 一定要算有效数字的位数。如 0.0426 m 是三位有效数字，0.0426m 和 4.26cm 及 42.6mm 三者是等效的，只不过分别采用了 m、cm 和 mm 作为长度的表示单位；4.260m 是四位有效数字。从有效数字的另一面也可以看出测量用具的最小刻度值，如 0.0426m 是用最小刻度为 mm 的尺子测量的，而 4.260m 是用最小刻度为 cm 的尺子测量的。

在单位换算中出现在可疑数字位后小数点左边出现 0 的现象，应采用科学计数法以防止出现对有效数字位增加的误解。如 340.4km 的长度在改为 340400m 时可能误认



为有效数字位从4位改为6位,应改用科学计数法 $3.404 \times 10^5 \text{ m}$ 。因此,正确掌握有效数字的概念对物理实验来说是十分必要的。

1.3.2 有效数字的运算

在求间接测量结果时,需要对多个直接测量结果进行运算,运算时为保证其结果有足够的有效数字,确保其准确程度,其结果的有效数字位数应根据以下运算法则处理:

(1) 有效数字的加减法运算。数值的加减运算,运算后的误差应该与运算前各数据的误差和相等,因此运算后的误差会增加。运算结果可疑数字位置应与参与运算的各量的可疑数字位置最高者相同。

$$\text{如 } 24.\underline{72} + 2.\underline{247} + 0.\underline{0065} = 26.\underline{9735} = 26.\underline{97}$$

$$24.\underline{72} - 2.\underline{247} - 0.\underline{0065} = 22.\underline{4665} = 22.\underline{47}$$

有效数字下面加横线表示可疑数。只保留一位可疑数字,计算结果可疑数字位置应与参与求和运算的3个数中可疑位最高的24.72相同。

在实际测量中,测量结果如果是若干个观测量进行加法或减法计算而得到时,应选用精度相同的仪器作测量最为合理。

(2) 有效数进行乘除法运算。数值的乘除运算,运算后的相对误差等于参与运算的各数值的相对误差之和,对测量结果来说有效数字越少,相对误差就越大,因此,乘积或商的结果的有效位数一般与参与运算的各量中有效位数最少者相同。

$$\text{如 } 365.\underline{5} \times 23.\underline{9} = 8735.\underline{45} = 8.\underline{74} \times 10^3$$

$$365.\underline{5} \times 23.\underline{90} = 8735.\underline{45} = 8735$$

如果间接测量结果是多个测量值进行乘除法运算而得到时,应按使测量值有效位数相同的原则来选择测量仪器。

(3) 乘方、开方运算的有效位数一般与其低的有效位数相同。

(4) 计算式中的系数是数学常数,不存在可疑数,因此可以视为无穷多位有效数,书写也不必写出后面的“0”。例如, $R = D/2$, R 的有效位数仅由直接测量值 D 的有效位数决定。无理常数 π , e 等在公式中参加运算时,位数的选取应比测量结果多一位。

(5) 有效数字的截取。在进行数据运算时,要根据有效数字的运算规则对数据进行截取,因此还存在一个尾数的舍入问题。对尾数的舍入原则是“四舍六入五凑偶”,即大于5时入,小于5时舍,正好等于5时将要保留的最后一位凑成偶数,要保留的最后一位是奇数时入,偶数时舍。这种原则是为了保证尾数舍、入的概率相等。如果是不确定度,则按照传统的四舍五入法进行截取。