

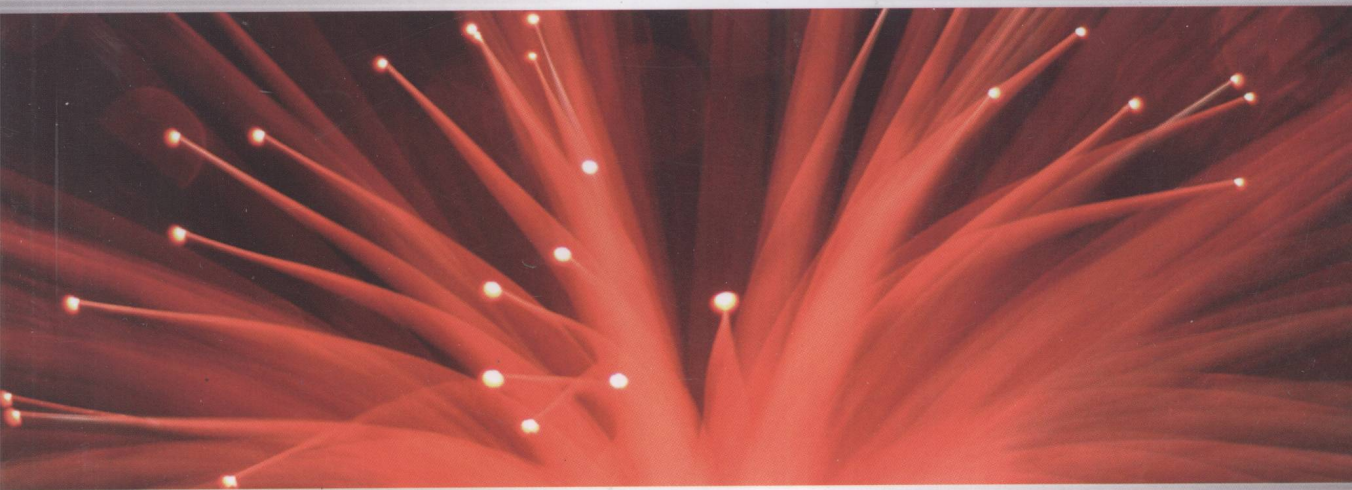


世纪普通高等教育基础课规划教材

大学物理实验

EXPERIMENT OF COLLEGE PHYSICS

陈子栋 潘伟珍 主编



PHYSICS



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪普通高等教育基础课规划教材

大学物理实验

主 编	陈子栋	潘伟珍	
副主编	金国娟	何云尧	张荣波
参 编	陈厚田	李 雪	
主 审	楼智美		



机械工业出版社

本书是为独立开设大学物理实验课程的普通高等院校理工类非物理专业学生编写的教材。全书共分四篇，第一篇为绪论、实验误差理论与数据处理；第二篇为基础性实验，包括 20 个实验；第三篇为综合性实验，包括 21 个实验；第四篇为设计与应用性实验，包括 9 个实验。每个实验包括实验目的、实验仪器、实验原理、实验内容、数据记录等内容，并附有思考题。本书可作为高等院校理工类各专业的大学物理实验课程的教材或参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验/陈子栋, 潘伟珍主编. —北京: 机械工业出版社, 2010. 1
21 世纪普通高等教育基础课规划教材
ISBN 978 - 7 - 111 - 28894 - 7

I. 大… II. ①陈…②潘… 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 (2010) 第 015394 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 张金奎 责任编辑: 张金奎 版式设计: 张世琴
封面设计: 王伟光 责任校对: 魏俊云 责任印制: 乔 宇
北京京丰印刷厂印刷
2010 年 2 月第 1 版 · 第 1 次印刷
184mm × 260mm · 16 印张 · 393 千字
标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 28894 - 7
定价: 26.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前言

大学物理实验是面向理工类专业学生开设的公共基础课,也是学生进入大学后学习的第一门实验课,是学生实验技能训练的开始。作为独立开设的大学物理实验课,其目的在于培养学生掌握正确的科学实验方法,提高学生的观察分析能力、应用创新能力和实际动手能力。物理实验的方法、思想及物理实验仪器和技术已广泛地应用在人类社会的各个领域。作为基本的实验课程,它能让学生学习到科学实验的基础知识,观察到各种实验现象,它能提高学生独立工作的能力,也能使学生在实验中对测量仪器的选择、测量条件的确定和实验方法的设计等方面受到训练。

本教材是在我校物理实验教学中心使用多年的《大学物理实验讲义》基础上经过改编、深化及更新而成。本书在实验项目编排上打破了传统的按实验内容编排实验项目的方法,而是采用从基础性、综合性,设计与应用性等层次化实验教学模式编排实验项目。全书分四篇内容,涉及实验项目共50个。第一篇是实验误差理论和数据处理,包括3章内容;第二篇是基础性实验,包括20个实验;第三篇是综合性实验,包括21个实验,第四篇是设计与应用性实验,包括9个实验。实验项目是根据我校物理实验课程教学改革和建设的需要,结合学生实际情况而设置的。本书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。

本书由陈子栋、潘伟珍主编,并由陈子栋负责进行全书统稿。

编写分工:陈子栋编写第一篇及实验三十四、三十六、四十二;潘伟珍编写实验十五~十九、实验三十八~实验四十一、实验四十五~实验四十七;金国娟编写实验一~实验七、实验二十一~实验二十三;何云尧编写实验十~实验十四、实验二十九~实验三十三、三十五、三十七;张荣波编写实验八、实验九、实验二十四~实验二十八、实验四十三、实验四十四;李雪编写实验四十八~实验五十;陈厚田编写实验二十。

本书由楼智美主审,并为本书提出了很好的意见。

大学物理实验在本校独立设课已有十多年,随着实验教学改革的深入,新技术、新方法、新仪器不断引入物理实验教学,书中难免存在不完善和不妥当之处,欢迎各位同行和使用本教材的师生提出宝贵意见和建议。

编者

2009年12月

目 录

前言

第一篇 实验误差理论与数据处理

第一章 绪论	1
第一节 如何做好大学物理实验	1
第二节 物理实验课的内容	1
第三节 怎样写好实验报告	2
第二章 误差理论与数据处理	3
第一节 测量与误差的基本概念	3
第二节 测量值的有效数字	6
第三节 测量结果的不确定度的评定	8
第四节 测量结果的处理	11
第三章 物理实验中常用的基本方法	15
第一节 物理实验数据处理的常用方法	15
第二节 物理实验中常用的基本方法	20
第三节 物理实验中的基本实验仪器调整技术	23
附录一 测量值的标准偏差	26
附录二 算术平均值的标准偏差	27
习题	28

第二篇 基础性实验

实验一 物体密度的测定	30
实验二 单摆法测定重力加速度	34
实验三 牛顿第二定律的验证	37
实验四 物体碰撞研究	42
实验五 复摆测重力加速度	45
实验六 转动惯量的测定	48
实验七 气轨上简谐振动的研究	52
实验八 空气比热容比的测定	55
实验九 冷却法测量金属的比热容	59
实验十 万用表的使用	62
实验十一 示波器的原理和使用	64
实验十二 电学元件的伏安特性测量	70
实验十三 惠斯登电桥测电阻	76
实验十四 用电流场模拟静电场	80
实验十五 薄透镜焦距的测定	84

实验十六	用牛顿环测定透镜的曲率半径	87
实验十七	分光计的调节及棱镜玻璃折射率的测定	91
实验十八	测量透明固体和液体的折射率	98
实验十九	用双棱镜干涉测钠光波长	103
实验二十	演示实验与仿真实验	106

第三篇 综合性实验

实验二十一	金属丝弹性模量的测定	116
实验二十二	声速的测定	119
实验二十三	弦振动研究	124
实验二十四	液体粘滞系数的测定(落球法)	129
实验二十五	用力敏传感器测液体表面张力系数	134
实验二十六	导热系数的测量	138
实验二十七	固体线胀系数的测定	143
实验二十八	液体粘滞系数随温度变化的研究	145
实验二十九	电表改装与校准	148
实验三十	磁化曲线和磁滞回线的测定	151
实验三十一	用霍尔元件测螺线管磁场	155
实验三十二	交流电桥实验	160
实验三十三	RL、RC 电路特性的研究	169
实验三十四	电磁聚焦与电子荷质比实验	173
实验三十五	电位差计实验中补偿法的研究	178
实验三十六	密立根油滴实验	182
实验三十七	非线性电阻伏安特性的研究	186
实验三十八	迈克尔逊干涉仪的调节和使用	188
实验三十九	光栅特性研究并用光栅测定光波波长	194
实验四十	利用超声光栅测定液体中的声速	197
实验四十一	偏振和旋光现象的观察和分析	202

第四篇 设计与应用性实验

实验四十二	双光栅振动	210
实验四十三	热敏电阻器的电阻温度特性研究	215
实验四十四	AD590 传感器温度特性测量及数字式温度计的设计	217
实验四十五	测定空气折射率	220
实验四十六	全息照相	223
实验四十七	阿贝成像原理和空间滤波	226
实验四十八	太阳能电池综合特性测试实验	231
实验四十九	高临界温度超导体临界温度的电阻测量法	236
实验五十	真空的获得、测量及镀膜	240
参考文献		248

第一篇 实验误差理论与数据处理

第一章 绪 论

第一节 如何做好大学物理实验

物理学是一门以实验为基础的科学，物理学概念的形成、物理规律的发现以及理论的建立，都要以实验为基础并接受实验的检验。可以说，没有物理实验，就没有物理学；没有物理实验的重大突破，就没有物理学的发展。

《大学物理实验》是为理工类学生设置的一门必修基础课程，是同学们进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端。本课程的目的和任务是：

一、通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习物理实验知识，加深对物理学原理的理解，提高对科学实验重要性的认识。

二、培养和提高学生的科学实验能力，其中包括：

1. 能够通过阅读实验教材或资料，作好实验前的准备；
2. 能够借助教材或仪器说明书，正确使用常用仪器；
3. 能够运用物理学理论，对实验现象进行初步的分析判断；
4. 能够正确记录和处理实验数据、绘制实验曲线、说明实验结果，撰写合格的实验报告；
5. 能够完成简单的、具有设计性内容的实验。

三、要正确认识《大学物理实验》课程的地位和作用，重视实验课；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、主动研究的探索精神，具有遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德。

第二节 物理实验课的内容

《大学物理实验》课程的教学主要由三个环节构成：实验准备阶段——实验预习；实验进行阶段——实验的实际操作；完成实验报告阶段——实验的数据处理和简明的总结报告。

一、实验预习

实验前的预习是一次“思想实验”的练习，即在实验课前认真阅读实验教材和有关资料，弄清实验的目的、原理和方法，然后在头脑中“操作”这一实验，拟出实验步骤，思考可能出现的问题和得出预想的结论，写出预习报告。

二、实验的实际操作

1. 遵守实验室规则。为了保证实验正常进行，以及培养学生严肃认真的工作作风和良

好的实验操作习惯，要求同学们遵守实验室规则；

2. 记录实验仪器设备型号、规格及编号，记录实验室环境数据（温度、气压、湿度等）；

3. 了解实验仪器的操作方法及注意事项。对于带电的实验，在接好实验线路后，需经教师或实验室工作人员检查，经许可后才能接通电源，以免发生意外；

4. 对有些实验，在正式测量之前可作试验性探索操作，以便更好地掌握仪器的操作方法；

5. 做实验时，要仔细观察和认真分析实验现象；

6. 在事先准备的原始数据记录纸上如实地记录实验数据和现象。

三、完成实验报告

实验报告是实验工作的总结，要求文字通顺、字迹端正、图表规范、数据完备、结论明确。一份好的实验报告应给同行以清晰的思路、见解和新的启迪。要养成在实验操作后在预习报告的基础上尽早写出实验报告的习惯，即对原始数据尽快进行处理和分析，得出实验结果并进行不确定度的评估和讨论。

第三节 怎样写好实验报告

实验报告通常分三部分。第一部分：预习实验报告；第二部分：实验数据记录；第三部分：数据处理与计算。

一、预习实验报告

预习实验报告在正式报告的前面部分，要求在实验前写好。内容包括：

1. 实验名称；

2. 实验目的；

3. 实验原理摘要

用较简短的文字扼要阐述实验原理，切忌照抄。力求图文并茂。图是指原理图、电路图或光路图等。写出实验所用的主要公式，说明各物理量的意义和单位，以及公式的适用条件等；

4. 主要仪器设备（型号、规格等可在实验时补写）；

5. 准备好记录实验原始数据的表格。

注意：未完成预习和预习报告者，教师有权停止其实验或将其成绩降档！

二、实验数据记录

此部分在进行实验时完成，内容包括：

1. 实验仪器

记录实验所用主要仪器的型号、规格和编号。记录仪器编号是一个良好的工作习惯，便于以后必要时对实验数据进行复查。实验室环境数据记录（温度、气压、湿度等）；

2. 实验内容

重点写出“做什么，怎么做”，哪些是直接测量量，哪些是间接测量，各用什么仪器及方法进行测量，结果的不确定度的估算方法等；

3. 实验步骤

主要记录实验仪器调节和测量的步骤、方法；

4. 实验数据和现象记录

数据记录应做到整洁、清晰、有条理，尽量采用列表法。要根据数据特点设计表格，力求简单明了，达到省工省时的目的。在表格栏内要注明单位。要实事求是地记录客观现象和实验数据，切勿将数据记录在草稿纸上，而应记录在已准备的实验记录本上，不能只记结果而略去原始数据，更不能为拼凑数据而将实验记录做随心所欲的修改。实验数据记录是进行实验的一项基本功，要养成良好的记录习惯。在实验操作中要逐步学会分析实验，排除实验中出现的各种故障，而不能过分地依赖教师。对实验所得结果要做出粗略的判断，与理论预期相一致后，再交教师签字认可。

注意：离开实验室前，要整理好所用的仪器，做好清洁工作，数据记录须经教师审阅签名。

三、实验数据处理与计算

此部分在实验后进行，内容包括：

1. 对实验内容和实验步骤进行归纳总结；
 2. 用本实验规定的方法计算测量结果、作图，并对测量值的不确定度进行估算；
 3. 结果表示：按标准形式写出实验结果（测量值、不确定度和单位），在必要时注明实验条件；
 4. 完成作业题：完成教师指定的作业题；
 5. 对实验中出现的说明和讨论，归纳出实验心得或提出建议等。
- 上交的实验报告必须附有经实验教师签字的原始数据记录纸。

注意：预习报告、原始数据记录和实验报告均采用实验室统一的实验报告册！

第二章 误差理论与数据处理

第一节 测量与误差的基本概念

物理实验的任务不仅在于观察各种自然现象，更重要的是要测量有关的物理量。在物理实验中可以得到大量的测量数据，而这些数据必须经过仔细的、正确的、有效的处理，才能得出合理的结论，从而把感性的认识上升为理性的认识，形成物理规律。因此，误差分析和数据处理是物理实验课的基础。

一、测量

1. 测量的定义

测量就是把待测的物理量与一个被选作标准的同类物理量进行比较，确定待测量与标准量的倍数关系，这个倍数称为待测量的数值，而这个标准量则称为该物理量的单位。可见，一个物理量必须由数值和单位组成，两者缺一不可。

选作比较用的标准量必须是国际公认的、惟一的和稳定不变的。各种测量仪器，如米尺，秒表，天平等，都有合乎一定标准的单位和与单位成倍数的标度。

2. 测量值的单位

按照中华人民共和国法定计量单位的规定, 物理量的单位均以国际单位制 (SI) 表示, 其中 m 米 (长度)、kg 千克 (质量)、s 秒 (时间)、A 安培 (电流强度)、K 开尔文 (热力学温标)、mol 摩尔 (物质的量) 和 cd 坎德拉 (发光强度) 是基本单位, 其他物理量的单位可由这些基本单位导出, 称为国际单位制的导出单位。

3. 测量的分类

根据获得测量结果方法的不同, 测量可以分为直接测量和间接测量。

(1) 直接测量

由仪器或量具直接与待测量进行比较读数, 称为直接测量。如用米尺测量物体的长度, 用安培表测量电流强度等。所得到的相应物理量称为直接测量量。

(2) 间接测量

需要借助一些函数关系由直接测量量计算出所要求的物理量, 这样的测量称为间接测量, 所得到的相应物理量称为间接测量量。如钢球的体积 V 可由直接测得的直径 D , 由公式 $V = \pi D^3 / 6$ 计算得到。这里 D 为直接测量量, V 为间接测量量。在误差分析和估算中, 要特别注意直接测量量与间接测量量的区别。

二、误差

每个待测的物理量都存在一个确定的客观实际数值, 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不完善, 以及实验人员技术水平的限制, 使得测量值与真值之间有一定的差异。这个差异就是测量误差。

1. 误差的定义

误差就是实际测量值 x 与客观真值 A 之差。误差可以用绝对误差 Δ 表示, 也可以用相对误差表示, 即:

绝对误差 = 测量值 - 真值, $\Delta = x - A$

相对误差 = 测量的绝对误差 / 真值 (%), $E = \frac{|\Delta|}{A} \times 100\% \approx \frac{|\Delta|}{x} \times 100\%$

被测量的真值是一个理想概念, 即被测量的真值是不知道的。但为了对测量结果的误差进行估算, 我们用“约定真值”来代替真值求误差。所谓“约定真值”就是我们自认为是非常接近被测量的真值的值, 而它们之间的差别可以忽略不计。一般情况下, 常把多次测量结果的算术平均值、标称值、校准值、理论值、公认值、相对真值等作为“约定真值”来使用。

2. 误差的分类

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。测量误差按其产生的原因与性质可分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。

(1) 系统误差

在多次测量同一物理量时, 误差值的数值和符号保持不变, 或按某一确定的规律变化, 或是有规律地重复。如仪器的缺陷, 或测量理论不完善, 或环境变化等对测量结果造成的误差, 都可以认为是系统误差。

系统误差有多种来源, 从物理实验教学角度分析, 主要有:

1) 仪器的零值误差

例如, 电表的指针不指在零位, 即产生零值误差。所以在使用电表前, 应先检查指针是

否指零, 否则须旋动零位调节器使指针指零。又如, 在使用千分尺测长度之前, 也要先检查零位, 并记下零位读数 (即零值误差或修正值), 以便对测量值进行修正。

例: 用千分尺测长度, 零位读数为 $C_x = 0.003\text{mm}$, 测量示值为 $L_A = 10.247\text{mm}$, 则实际测量值为 $L_x = L_A - C_x = 10.244\text{mm}$ 。所以

$$\text{实际测量值} = \text{测量示值} - \text{零值误差}$$

2) 仪器结构误差和测量附件误差

仪器结构误差: 如由于等臂天平的两个臂实际上不相等, 或者惠斯顿电桥两个比例臂示值相等但实际上不相同等各种原因, 这类误差可用诸如交换测量法来消除。测量附件误差: 如电学实验线路中开关、导线等剩余电阻所引入的误差, 有时可用替代法来巧妙地避免这些误差的影响。

3) 实验理论和方法误差

由于实验理论和方法不完善, 所引用的理论与实验条件不符等情况产生的误差。如在空气中称重而没有考虑空气浮力的影响; 测量长度时没有考虑热胀冷缩使尺子长度的改变; 用伏安法测未知电阻, 由于电表内阻的影响, 使测量值比实际值总是偏大或总是偏小等。

4) 环境误差

由于外部环境如温度、湿度、光照等与仪器要求的环境条件不一致而引起的误差。

5) 其他按一定规律 (指非统计规律) 变化的误差

例如, 在一直流电路中, 可分别精确地测出两串联电阻电压 U_1 、 U_2 , 并由 U_1/U_2 求得此两电阻之比。但由于干电池在工作时, 其电动势随时间均匀地略有下降, 依次测定 U_1 、 U_2 时的电路电流就有所不同, 因此 U_1/U_2 就具有与时间有关的误差。

从上述对系统误差的介绍可知, 我们不能依靠在相同条件下多次重复测量来发现和消除系统误差, 但是系统误差可以进行修正。在实验中发现系统误差是个实验技能问题, 通常取决于实验者的经验和判断能力。在物理实验教学中, 处理系统误差的通常做法是, 首先, 对实验依据的原理、方法、测量方法和所用仪器等可能引起误差的因素进行分析, 查出系统误差源; 其次, 通过改进实验方法和实验装置、校准仪器等方法对系统误差加以补偿和抵消; 最后, 在实验数据处理中对测量结果进行理论修正, 尽可能减小系统误差对实验结果的影响。

在本书中, 我们把处理系统误差的思想和方法放到每个实验中进行讨论。比如在长度测量实验中对零值误差进行修正, 牛顿环实验中, 用逐差法消除中心难以确定而引起的系统误差等。

(2) 随机误差 (偶然误差)

随机误差 (常称偶然误差) 是指在相同的条件下, 多次测量同一个量值时, 误差的数值和符号均以不可预知的方式变化的误差。

随机误差是实验中各种因素的微小变动引起的。例如测量对象的自身微小变化, 测量仪器指示数值的微小变动, 以及观测者本人在判断和估计读数时的变动等。这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量的平均值发生有涨落的变化, 这种变化量就是各次测量的随机误差。在测量过程中, 即使系统误差已经消除, 在相同的条件下重复测量同一物理量, 仍然会得到不同的结果。可见, 随机误差的来源是非常复杂且难以确定的。因此, 我们不能像处理系统误差那样去查出产生随机误差的原因, 然后通过一定的方法予以修正或消除。

(3) 粗大误差

粗大误差是由于观察者不正确地使用仪器, 观察错误、数据记录错误等不正常情况引起的误差。它会明显地歪曲客观现象, 在实验数据处理中, 应按一定的规则来剔除粗大误差。

在作误差分析时, 要估计的误差通常只有系统误差和随机误差。

总之, 由于误差的性质不同, 来源不同, 处理方法不同, 对测量结果的影响也不同。实验者要根据误差的来源和性质的不同, 采取不同的方法加以解决。尽管我们采取各种办法来减少测量误差, 但实验结果总是会存在误差的。因此, 要对实验结果的质量进行评价, 以反映测量结果的优劣程度。

三、测量结果的评定

对于测量结果做总体评定时, 一般是把系统误差和随机误差联系起来看。通常用准确度、精密度、精确度来评定测量结果, 但是这些概念的含义不同, 使用时应加以区别。

(1) 准确度: 是指测量值与真值的接近程度。反映系统误差的影响, 系统误差小则准确度高;

(2) 精密度: 表示测量结果中随机误差大小的程度。它是指在一定的条件下进行重复测量时, 所得结果的相互接近程度, 是描述测量重复性高低的指标。即测量数据的重复性好, 随机误差较小, 则精密度高;

(3) 精确度; 它反映系统误差和随机误差综合的影响程度。精确度高, 说明准确度和精密度都高, 意味着系统误差和随机误差都小。一切测量都应力求实现既精密又准确。

可用打靶的例子来说明上述三种情况, 如图 1-2-1 所示: 图 a 是精密度高而准确度低; 图 b 是准确度高而精密度低; 图 c 是精确度高, 既准确又精密。

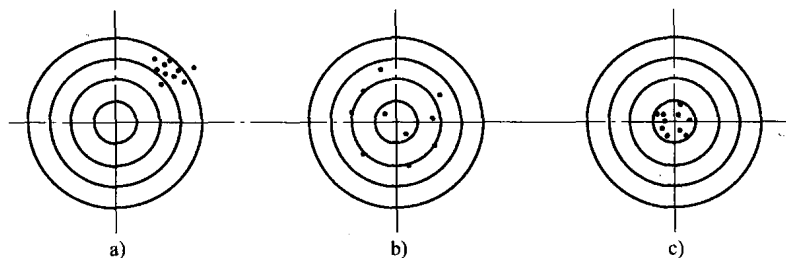


图 1-2-1 表示误差的三种情况

第二节 测量值的有效数字

一、有效数字

1. 有效数字的定义

测量结果的数值中可靠位数字与估读的一位估计数字 (不确定的) 组成的数字, 称为有效数字。

在物理实验中的测量值都是有效数字, 如: 123、26.300、10.56 等。123 是三位有效数字, 26.300 是五位有效数字, 而 10.56 是四位有效数字。

2. 测量值的有效数字读取

测量总是有误差的, 它的数值不能无止境地写下去。例如, 用米尺测量一物体长度, 如图 1-2-2 所示, 其长度 $L = 24.3\text{mm}$, 最后一位“3”是估读出来的, 是可疑数字, 也即在该

位上出现了测量误差（小数点后第一位上）。如果用精度更高的游标卡尺测量同一长度，结果为 $L = 24.30\text{mm}$ ，此时小数点后第二位上的“0”是估读位即误差所在位。在数学上 $24.3 = 24.30$ ，但对测量值的有效数字，则 $24.3 \neq 24.30$ ，因为 24.3 是三位有效数字，而 24.30 是四位有效数字，它们有着不同的误差，不同的准确度。

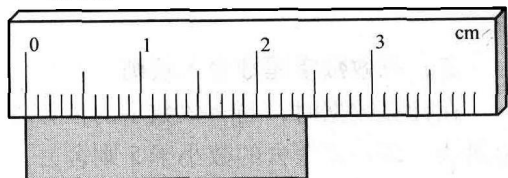


图 1-2-2 测量值的有效数字

在物理实验中常用的量具和仪器的测量读数可分为刻度型（包括带旋转刻度轮的仪器）、游标型、数字型三种。一般规定对有刻度的量具或实验仪器，测量值的有效数字为最小分度的后一位是估计位，则有效数字就由该位置决定，如：米尺、千分尺（螺旋测微计）、百分表、指针式电表等。对带有游标的量具或仪器，测量值的有效数字则由最小分度值决定，如游标卡尺、分光计等。对数字式量具或仪器，读数即为有效数字（或由该仪器的误差决定其有效数字）。

3. 有效数字的其他表示

(1) 有效数字的科学表示

对有效数字进行科学表示时，底数即为有效数字的位数。如 2.340×10^5 表示有效数字的位数为四位，该有效数字不能表示为 234000 。有效数字的科学表示在单位之间进行换算时尤为重要。

(2) 常数的有效数字

常数的有效数字位数，一般比测量值多取一位参与运算。如测量某球的体积，已测得球的直径为 $D = 6.210\text{mm}$ ，体积为 $V = \pi D^3/6$ ，则常数 $\pi = 3.1416$ 参与运算。

二、有效数字的运算

在实验数据运算中，首先应保证测量的准确度。在此前提下，运算时应使测量结果具有正确的有效数字，其位数不要少算，也不要多算。少算会带来附加误差，降低测量结果的精度；多算没有必要，决不可能减少测量误差。

1. 加、减运算

多个有效数字相加（相减）时，其和（差）值的有效数字位数与参加运算的有效数字中小数点后位数最少的一个相同。下面例中的有下划线的数字为估计位。

$$\begin{array}{rcl} \text{例 1. } 20. \underline{1} + 4.17 \underline{8} & & 20. \underline{1} \\ = 24. \underline{27} \underline{8} = 24. \underline{3} & & +) 4.17 \underline{8} \\ & & \hline & & 24. \underline{27} \underline{8} \quad \rightarrow 24. \underline{3} \end{array}$$

2. 乘、除运算

多个有效数字相乘（除）时，其积（商）所保留的有效数字位数，与参加运算的有效数字中小数点后位数最少的一个相同。

$$\begin{array}{rcl} \text{例 2. } 4.17 \underline{8} \times 10. \underline{1} & & 4.17 \underline{8} \\ = 42. \underline{19} \underline{7} \underline{8} = 42. \underline{2} & & \times) 10. \underline{1} \\ & & \hline & & 0.417 \underline{8} \\ & & 41.7 \underline{8} \\ & & \hline & & 42. \underline{19} \underline{7} \underline{8} \quad \rightarrow 42. \underline{2} \end{array}$$

3. 乘方开方的有效数字与其底的有效数字相同

4. 对数函数、指数函数和三角函数运算结果的有效数字位数必须由不确定度决定其位数

三、有效数字尾数舍入规则

在计算数据时，当有效数字的位数确定以后，应将多余的位数舍去，其舍入规则为尾数凑偶法，即：需舍去的数小于 5 则舍去，大于 5 则进入，等于 5 则把尾数变成偶数。

例 3. 4. 32749 → 4. 327 4. 32750 → 4. 328

4. 32751 → 4. 328 4. 32850 → 4. 328

这样的舍入规则可使舍和入的机会均等，避免在处理较多数据时因人多舍少而带来的系统误差。

四、测量结果的有效数字取舍原则：

(1) 最后运算结果保留一位估计位。若运算结果是某一中间数值，则保留二位再参与后续运算；

(2) 由测量结果的不确定度决定有效数字的位数。

第三节 测量结果的不确定度的评定

一、不确定度的概念

由于测量误差的存在，任何一个测量值都不可能绝对精确，它必然是不确定的。既然测量误差是不可避免，那么现行的方法是根据测量数据和测量条件来进行推算，求得误差的估计值，这就是“不确定度”的评定。近年来，人们已经越来越普遍地用一种科学的、合理的、公认的方法来表征这种不确定程度，并认为，在测量结果的定量表述中，“不确定度”比“误差”更为合适。本书用 Δ 表示不确定度。

测量不确定度，指由于测量误差的存在而对测量值不能肯定（或可疑）的程度，测量不确定度是测量结果所含有的一个参数，用以表征合理地赋予被测量值的分散性。在测量方法正确的情况下，不确定度愈小，表示测量结果愈可靠；反之，不确定度愈大，它的可靠性愈差。

二、不确定度的分类

此处主要分析的是随机误差（偶然误差）的不确定度。不确定度可分为 A、B 二类。

1. A 类不确定度

(1) A 类不确定度的定义

在同一条件下多次重复测量，用统计学方法计算出的不确定度分量，用 Δ_A 表示。如测量值的标准偏差 S_x ，平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 都是 A 类不确定度。

(2) A 类不确定度的正态分布

在相同条件下，对同一物理量进行重复多次测量，测量误差服从正态分布（或称高斯分布）规律。由测量误差产生的不确定度也符合正态分布规律，标准化的正态分布曲线如图 1-2-3 所示。图中横坐标 x 代表某一物理量的实验测量值，纵坐标 $p(x)$ 为测量值的概率密度，且

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (1-2-1)$$

式中, $\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum x_i}{n}$ 称算术平均值; $\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n}}$ 为正态分布的随机误差, 是表示测量的分散性的一个重要参数。从曲线可以看出测量值在 $x = \mu$ 处概率密度最大, 曲线峰值处的横坐标对应于测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时被测量总体平均值 μ 。横坐标上任一点到 μ 值的距离 $x - \mu$ 即为测量值 x 相应的随机误差分量。随机误差分量小的概率大, 随机误差分量大的概率小。 σ 表示曲线上拐点处的横坐标与 μ 值之差的绝对值, 它是表示测量值的分散性的重要参数, 称为正态分布的随机误差。

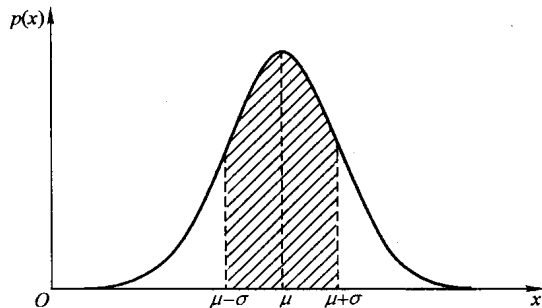


图 1-2-3 正态分布曲线

服从正态分布的随机误差有以下特征:

- 1) 单峰性: 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大;
- 2) 对称性: 绝对值相等、符号相反的正、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;
- 4) 补偿性: 随机误差的算术平均值随测量次数的增加而减小。

(3) 随机误差 σ 、标准偏差 S_x 和平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$

1) 随机误差 σ

对测量中的随机误差如何处理? 对于随机误差作出估计的方法有多种, 常用的方法是用标准偏差来替代误差, 从上面可知, 随机误差为

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

式中, μ 是 $n \rightarrow \infty$ 时的算术平均值, 在不考虑系统误差时, 它可以认为是最接近被测量的真值。但由于实验中不可能做无限多次测量, 因此必须确定有限次测量的随机误差的估计方法。

2) 标准偏差 S_x

由于在物理实验中测量次数总是有限的, 通常为 $n \ll \infty$, 为此, 我们实际应用有限次的标准偏差公式

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

上式称为贝塞尔公式 (见本篇附录一), 式中, $\bar{x}$ 是有限次测量的算术平均值。

3) 平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$

对有限次的物理实验测量, 一般情况下为次数 $n \leq 10$, 在这有限次测量后, 通常以平均值 $\bar{x}$ 来表达测量结果。而平均值 $\bar{x}$ 本身显然也是一个随机变量。因为平均值已经对单次测量的随机误差进行了一定程度的抵消, 所以平均值的标准偏差要比单次测量值的标准偏差小。可以证明平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ (见本篇附录二) 为

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

注意：规定本大学物理实验课程中的多次测量结果的 A 类不确定度，用平均值的标准偏差表示，即 $\Delta_A = S_{\bar{x}}$ 。

2. B 类不确定度

(1) B 类不确定度的定义

用其他非统计方法估算出的不确定度的分量，用 Δ_B 表示。如单次测量结果的不确定度的计算，就用 B 类不确定度表示。众所周知实验中所使用的仪器都是有示值误差的，也都有示值误差的规定，用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示仪器的示值误差，B 类不确定度与仪器示值误差（简称仪器误差）的关系为

$$\Delta_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{C} \quad (1-2-5)$$

式中， C 是大于等于 1 的修正因子。那么，在物理实验中 B 类不确定度 Δ_B 的修正因子 C 如何确定呢？这是一个比较困难的问题，这需要实验者的经验、知识、判断力以及对实验过程中所有有价值信息的把握和分析，然后合理地估算出 B 类不确定度 Δ_B 的修正因子 C 。但对于一般的教学实验，可简单取 $C=1$ ，即把仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 直接作为非统计方法估算的 B 类不确定度的分量 Δ_B 。

注意：本大学物理实验课程规定 $\Delta_B = \Delta_{\text{仪}}$ ，即 $C=1$ 。

(2) B 类不确定度的估算

1) 有刻度的仪器与量具 $\Delta_{\text{仪}}$ 的确定

如果带有刻度的仪器与量具有误差规定，则按规定取仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 。若没有规定则取仪器与量具的最小分度值的一半。

2) 有游标的仪器与量具仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 取最小分度值。

3) 电表的仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 则由电表的准确度等级 k 和量程 A_{max} 决定，即

$$\Delta_{\text{仪}} = A_{\text{max}} \times k\% \quad (1-2-6)$$

4) 数字式仪器与量具的仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 则按使用说明书的规定选取。

三、不确定度的合成

A、B 两类不确定度的分量采用“方、和、根”法合成，这是由于决定合成不确定度的两种误差——随机误差和仪器误差是两个相互独立不相关的随机变量，其取值具有随机性。根据不确定度的宁大勿小的原则，即有

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (1-2-7)$$

一般在实验中， Δ_A 、 Δ_B 可能不是单项，而是包含几项，即一个测量的最终结果可能同时存在好几项不确定度的影响，而这些误差来源又互不相关，则合成不确定度的表示式为

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_{Ai}^2 + \sum_{j=1}^m \Delta_{Bj}^2} \quad (1-2-8)$$

注意：在本实验课程中规定，不确定度 Δ 只取一位，且最后的不确定度 Δ 的进位原则是只进不舍。

第四节 测量结果的处理

由于测量误差是不可避免的,使得真值无法确定。又因真值未知,也就无法确定误差的大小。因此,实验数据的处理只能求出实验测量的最佳估计值及其不确定度。一个完整的测量结果应包含三个要素:测量结果的最佳估计值、不确定度和单位。所以通常把测量结果表示为:

$$\text{测量值} = \text{最佳估计值} \pm \text{不确定度 (单位)}$$

一、直接测量结果表示

1. 单次直接测量结果与不确定度的表示

在实际测量中,有时测量不能或不需要重复多次;或者仪器精度不高,测量条件比较稳定,多次测量同一物理量结果相等。例如,用准确度等级为 2.5 级的万用表去测量某一电流,经多次重复测量,几乎都得到相同的结果。这是由于仪器的精度较低,一些偶然的未控因素引起的误差非常小,仪器不能反映出这种微小的变化。因而,在这种情况下只需进行单次测量,把单次测量值 x 作为最佳值。

单次测量结果的不确定度如何确定呢?显然根据 A 类不确定度的定义,单次测量的 $\Delta_A = 0$ 。尽管此时 Δ_A 依然存在,但在单次测量的情况下,往往是 $\Delta_{\text{仪}}$ 要比 Δ_A 大得多。所以,对于单次测量,其不确定度 Δ 可简单地用仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 来表示,即

$$\text{单次测量结果} = \text{测量值} \pm \Delta_{\text{仪}} \text{ (单位)}$$

$$X = x \pm \Delta \text{ (单位)} \quad (1-2-9)$$

2. 多次直接测量结果与不确定度的表示

由于测量中存在随机误差,为了获得测量最佳值,并对测量结果做出正确评价,就需要对被测量进行多次重复测量。显然,测量次数增加,能减少随机误差对测量结果的影响。在物理实验中,考虑到测量仪器的准确度和测量方法、环境等因素的影响,对同一物理量作多次直接测量时,一般把测量次数定在 10 次左右较为妥当。

取多次重复测量结果的最佳估计值为多次重复测量值的算术平均值,因为多次重复测量值的算术平均值最为接近被测量的真值。

(1) 最佳估计值

设被测量的真值为 A , 多次测量值为 $(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$, 则每次测量误差为

$$\Delta x_i = x_i - A \quad (1-2-10)$$

n 次测量误差之和为

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = \sum_{i=1}^n x_i - nA \quad (1-2-11)$$

测量真值为

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (1-2-12)$$

由于随机误差具有补偿性,故当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \rightarrow 0$, 因此

$$A \rightarrow \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-2-13)$$