21世纪高等院校教材

主编 朱孝义

大学物理实验教程

科学出版社
www.sciencep.com

21世纪高等院校教材

大学物理实验教程

主　编　朱孝义
副主编　郭　涛　赵　惠　张　江
　　　　裘平一　张素萍
主　审　曹文娟　杜建国

科学出版社
北　京

内 容 简 介

本书是在整理多年使用的大学物理实验讲义的基础上修订而成.全书共分五章,第一章主要介绍了测量误差及数据处理基础知识;第二章至第五章共编入50个实验,内容包括力学实验、热学实验、电磁学实验、光学实验和近代物理实验.这些实验既承袭了传统实验的经典实验方法,又增加了物理技术与计算机技术相结合的新实验方法,不少实验还采用了数字、传感等现代化实验技术.

本书适合普通高等院校理工科专业本科及专科学生学习使用,也可作为教授实验课程的老师的参考用书.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/朱孝义主编.—北京:科学出版社,2007
21世纪高等院校教材
ISBN 978-7-03-019849-5

Ⅰ.大… Ⅱ.朱… 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(2007)第135116号

责任编辑:胡云志 / 责任校对:郑金红
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

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
双青印刷厂 印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2007年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16
2007年9月第一次印刷 印张:20 1/4
印数:1—6 000 字数:467 000

定价:27.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前　言

本书是按照教育部颁发的《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》并根据目前各校实验室普遍使用的仪器设备情况编写的物理实验教材. 在教学要求上体现出既重视基本实验技术的训练，又重视综合实验能力、实验创新能力的培养. 全书共编入 50 个实验，将这些实验分为普通物理和近代物理两部分，前者包括力学实验、热学实验、电磁学实验、光学实验. 为了提高学生的学习主动性和探索精神，根据先简后繁、先易后难和循序渐进的原则，将实验分成基础实验、综合性实验、近代物理实验、设计性实验四个层次. 教师可根据学生专业及其他情况，按照《大学物理实验教学大纲》的基本要求进行选择. 基础性实验是适应各专业的普及性必做实验，使学生能在指定时间内完成. 其他层次的实验在教学时间、空间和内容上要进行合理安排，并给学生较大的选择自由. 教学中还配以包括网络技术、多媒体教学软件和模拟仿真实验在内的现代教育技术，作为本书的补充，尽可能满足各层次学生求知的需要，适应学生的个性发展.

物理实验课程一般不少于 54 学时，对于理科非物理专业和某些需要加强物理基础的工科专业，实验学时一般不少于 64 学时. 每个实验安排 3 学时，分两学期进行.

本书是教师通过多年的教学实践积累，并经过多次调整、更新和扩充，凝聚了许多教师的智慧和劳动. 参加编写的教师有朱孝义、郭涛、赵惠、张江、裘平一、张素萍. 其中绪论，实验 1～7、10、11、14、18、21、25～27、30、33，设计性实验 36～50 由朱孝义编写；实验 9、12、13 由张素萍编写；实验 8、16、17、23、24、28、29、35 由郭涛、裘平一编写；实验 20、22、34 及附录由张江编写；实验 15、19、31、32 由赵惠编写. 本书由朱孝义担任主编，郭涛、赵惠、张江、裘平一、张素萍任副主编. 曹文娟、杜建国任主审. 参加编写的还有张琳、刘娜.

由于时间有限，错误、疏忽之处在所难免，敬请读者批评指正.

编　者

目　录

前言
第一章　绪论 …… 1
第一节　大学物理实验课程的任务和要求 …… 1
第二节　测量与误差 …… 3
第三节　随机误差的估计 …… 7
第四节　测量不确定度 …… 17
第五节　引用误差 …… 19
第六节　仪器误差 …… 20
第七节　有效数字 …… 22
第八节　数据处理的常用方法 …… 24
习题 …… 32
第二章　基础实验 …… 34
实验 1　物体密度的测量 …… 34
实验 2　气轨上运动定律的研究 …… 41
实验 3　测定金属的杨氏模量 …… 49
（一）用光杠杆法测杨氏模量 …… 49
（二）用霍尔位置传感器法测杨氏模量 …… 52
实验 4　用三线摆测定转动惯量 …… 57
实验 5　刚体转动实验 …… 61
（一）用刚体转动实验仪测转动惯量 …… 61
（二）用智能刚体转动惯量实验仪测转动惯量 …… 66
实验 6　液体表面张力系数的测定 …… 71
实验 7　用落球法测定液体的黏滞系数 …… 73
（一）测定液体在常温的黏滞系数 …… 73
（二）测定液体在不同温度的黏滞系数 …… 77
实验 8　液体比热容的测量 …… 81
实验 9　惠斯通电桥测电阻 …… 85
实验 10　用模拟法测绘静电场分布 …… 90
实验 11　示波器的使用 …… 96
实验 12　*RC*、*RL* 电路的暂态过程 …… 112
实验 13　用补偿法测电动势 …… 117
实验 14　交流电桥 …… 120
实验 15　薄透镜焦距的测定 …… 129

实验 16 等厚干涉 …… 134
实验 17 分光计实验 …… 138
(一) 分光计的调整和使用 …… 138
(二) 极限法测透明介质折射率 …… 144
第三章 综合性实验 …… 147
实验 18 超声声速测定 …… 147
实验 19 双臂电桥测低值电阻 …… 151
实验 20 用冲击电流计测量磁感应强度 …… 157
实验 21 利用霍尔效应测磁场 …… 167
实验 22 电子束的电偏转和磁偏转 …… 174
实验 23 迈克耳孙干涉仪实验 …… 179
(一) 迈克耳孙干涉仪的调整和使用 …… 179
(二) 测量钠光的波长和相干长度 …… 184
实验 24 偏振光实验 …… 186
实验 25 摄影技术 …… 192
第四章 近代物理实验 …… 201
实验 26 微波光学实验 …… 201
实验 27 密立根油滴法测定电子电荷 …… 211
实验 28 夫兰克-赫兹实验 …… 217
实验 29 氢原子光谱的研究 …… 224
实验 30 全息照相 …… 228
实验 31 阿贝成像原理和空间滤波 …… 238
实验 32 用光电效应测定普朗克常量 …… 243
实验 33 塞曼效应 …… 249
实验 34 传感器的应用 …… 258
(一) 金属箔式应变片-单臂电桥(位移传感器) …… 264
(二) 金属箔式应变片单臂、半桥、全桥比较 …… 266
(三) 金属箔式应变片单臂电桥(称重传感器) …… 267
实验 35 核磁共振 …… 268
第五章 设计性实验 …… 276
实验 36 用自由落体测定重力加速度 …… 276
实验 37 测定偏心轮绕定轴的转动惯量 …… 278
实验 38 气轨上弹簧振子的简谐振动 …… 278
实验 39 线胀系数的测定 …… 279
实验 40 电位差计测电池的内阻 …… 280
实验 41 测定热电偶的温差电动势 …… 281
实验 42 电表的扩程和校准 …… 281
实验 43 伏安法测二极管特性 …… 282

实验 44　用伏安法测低值电阻 …… 283
实验 45　利用利萨如图形测定 RL 串联电路的相频特性 …… 284
实验 46　测定单缝衍射的光强分布 …… 285
实验 47　光波波长的测量及光栅特性 …… 286
实验 48　自组迈克耳孙干涉仪测空气折射率 …… 286
实验 49　自组望远镜和显微镜 …… 288
实验 50　用非平衡电桥测铂电阻的温度系数 …… 289
附录 …… 291
电磁学实验基本常识及常用仪器介绍 …… 291
附表 …… 305
附表 1　基本物理常数表 …… 305
附表 2　国际单位制(SI) …… 307
附表 3　物质密度表 …… 309
附表 4　在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数 …… 310
附表 5　液体的黏滞系数 η …… 311
附表 6　固体导热系数 λ …… 311
附表 7　固体的线膨胀系数 …… 312
附表 8　在 20℃时某些金属的弹性模量(杨氏模量) …… 312
附表 9　部分金属、合金与铂(化学纯)构成热电偶的热电动势 …… 313
附表 10　某些金属和合金的电阻率及其温度系数 …… 313
附表 11　某些物质的折射率(相对空气) …… 314
附表 12　常用光源的谱线波长表 …… 314
附表 13　海平面上不同纬度处的重力加速度 …… 315
附表 14　不同温度时干燥空气中的声速 …… 315

第一章　绪　　论

第一节　大学物理实验课程的任务和要求

一、大学物理实验课程的地位和作用

物理学从本质上说是一门实验科学.伽利略、牛顿、爱因斯坦等许多科学家以科学实验的方法研究自然规律，逐渐形成了物理科学.尽管物理学本身可以在一定限度内从理论上用逻辑推理的方法获得新理论，但最终还要依靠实验来验证.麦克斯韦提出的电磁理论只有当赫兹作出电磁波实验后才被人们公认；杨振宁、李政道提出了至少在基本粒子的相互作用的领域内宇称不守恒理论，只有当吴建雄作出验证实验后，才被同行学者承认，从而才有可能在 1957 年获得诺贝尔奖.应该说，物理实验在物理学的创立和发展中一直起着十分重要的作用，同时在探索和开拓新的科学领域中也是很有力的工具.我们在学习物理学时，应正确处理理论与实验的关系，不可偏废于一方.

根据教育部颁发的《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》的规定，物理实验是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程，是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端.它的宗旨就是对学生探索精神、科研思维、实践能力和创新精神的培养，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应用能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用.

二、大学物理实验课程的目的和任务

① 在具有一定大学物理知识和中学物理实验的基础上，对学生进行实验方法和实验技能的基本训练.通过实验，要求学生做到：看懂实验教材，仪器说明书，参考资料，了解一些物理量的测量方法，熟悉常用仪器的基本原理和性能，掌握其使用方法，能够正确记录、处理实验数据，分析结果，撰写实验报告.

② 通过对实验过程的观察、测量和分析进一步加深对物理概念和理论的理解.

③ 培养学生具有对待科学实验一丝不苟的严谨态度和实事求是的工作作风.

物理实验课是一门实践性课程，学生是在自己独立工作的过程中增长才干，希望学生在物理实验课学习过程中不断提高学习兴趣，为培养自己成为优秀的科学技术人才打好基础.

三、实验课程序

物理实验课包括预习、实验操作、撰写实验报告三个环节.要求学生按下面程序完成每个实验.

1. 预习

实验前的预习是保证实验顺利进行，并能取得满意结果的重要步骤. 预习的要求是：

① 阅读实验教材和参考资料，弄清实验目的、原理和方法.

② 了解所用仪器性能和使用方法.

③ 写出预习报告，内容包括：实验名称、目的、仪器、原理或计算公式（电学实验应画出简单的电路图）、数据表格.

2. 实验

① 在教师作启发性讲解时，特别要注意预习环节没有弄懂的问题、注意事项及特殊规定.

② 仪器的安装与调整. 测量时必须满足仪器的正常工作条件.

③ 测量与观察. 基本按实验步骤进行操作，如实记下测量数据（原始数据）和观察到的现象.

④ 实验中出现的问题应及时向教师请教. 实验完毕，数据应交教师审阅批准，再将仪器整理复原后方能离开实验室.

3. 实验报告

实验报告是实验学习的最后环节，是整个实验工作的重要组成部分. 通过写实验报告可以逐步培养撰写科学技术报告和工作总结的能力，同时实验报告还是提交教师决定实验成绩的主要依据. 因此实验结束后，应尽快整理好数据，写出实验报告. 报告文字叙述力求简练，数据齐全、图表规范、字迹工整、书面清洁.

实验报告内容：

① 实验名称.

② 实验目的.

③ 实验仪器（注明规格、型号、精度）.

④ 实验原理. 简明扼要地写出本实验的原理和测量方法要点，写出数据处理时必须要用的一些主要公式，并标明公式中物理量的意义. 电学、光学实验要画出电路图和光路图.

⑤ 实验步骤. 根据操作的实际情况，写出实验步骤，对于关键的难度大的步骤可详细写出.

⑥ 数据和数据处理. 首先要列出全部原始数据，不要擅自修改，数据一般要画表格填写. 然后进行测量结果计算，要有计算过程. 要求作图的应按作图规则用方格纸细心描出.

⑦ 误差（或不确定度）处理.

⑧ 写出结果表达式.

⑨ 分析误差来源（以分析系统误差为主）.

⑩ 讨论及回答问题. 必要时对实验结果、验证的问题进行讨论，做出结论. 另外要回答教师指定的问题.

四、实验室规则

① 保持实验室内环境的肃静和整洁.

② 实验前要根据“仪器卡片”检查仪器，如有损失，立即向教师报告.

③ 未了解仪器性能之前切勿动手，使用仪器时，必须严守仪器操作规程，不准擅自拆卸仪器.

④ 仪器发生故障、损坏或丢失时，应立即报告教师，凡由于粗心大意或违反操作规定而损坏仪器的要酌情赔偿.

⑤ 凡使用电源的实验，应请教师检查线路，经允许后方可接通电源.

⑥ 注意爱护和正确使用仪器，注意节约材料和水、电等.

⑦ 实验完毕，立即关闭电源、水源，将仪器恢复到实验前的状态，并认真填写“学生课堂考核登记卡”，经教师检查和在“预习报告”及“学生课堂考核登记卡”上签字后，方可离开实验室.

⑧ 在开放式实验教学中，遵照“开放实验室管理办法”执行.

第二节 测量与误差

一、测量

为确定待测对象的量值而进行的实验过程称为测量. 物理实验就是借助仪器将待测物理量同一选作单位的标准物理量进行直接或间接比较来确定它们间的倍数关系，从而得出待测物理量的量值. 所以测量是物理实验的基本过程.

测量的基本分类如下.

1. 按测量方法分类

① 直接测量：用测量仪器直接读出待测量值的测量. 例如，用米尺测长度、用天平称质量、用停表计时间等.

② 间接测量：利用某些原理和公式，由直接测量得到的若干物理量推算出待测量值的测量. 例如，测量钢柱密度时，它可由直接测量的高、直径和质量根据物体的密度公式算出.

2. 按测量条件分类

① 等精度测量：在测量人员、仪器、方法、环境等测量条件不变的情况下进行的多次重复性测量. 另外在实际测量中，若某些次要条件变化后对测量结果无明显的影响，一般也按等精度测量处理.

② 不等精度测量：若测量中，测量条件只要其中一个发生变化，就变成不等精度测量.

3. 按测量结果的情况分类

① 绝对测量：为进行测量须规定一些标准单位，如选定长度的单位为米、质量的单位为千克、时间的单位为秒、电流强度的单位为安培等. 凡利用与这些选作为标准单位的标准量进行比较而得出待测量绝对大小的测量. 例如：尺子量度物长、天平称质量等.

② 相对测量：测量结果仅给出待测量与标准量之间的差值或比值的测量. 例如，波长的相对测量，可通过对两种波长的牛顿环测量，由一已知标准波长相对地测出另一未知波长.

4. 按测量过程中物理量的状态分类

① 静态测量:指测量过程中待测物理量是不变的或者在相当程度上可以认为是不变的. 例如,物体长度测量和质量测量.

② 动态测量:指测量过程中待测物理量是随时间变化的. 例如,测量加热过程中各时刻物体的温度.

二、误差

(一) 误差的定义

任何物质都有自身各种各样的特征,反映这些特征的物理量在某一时刻和某一位置或状态下的效应体现了客观的真实数值,称为真值.

真值是一个理想的概念,通常一个物理量的真值是不知道的. 我们测量的目的就是要力图得到真值. 但在任何的实际测量中,因各种原因,比如测试者的操作、调整和读数不可能完全准确,实验理论的近似性,仪器结构不可能完美无缺,环境的不稳定性等,待测量的真值是不可能测得到的,测量值与真值间总会存在着或多或少的差异. 我们把测量值与真值之差称为误差. 若测量值为 N,真值为 N_0,则测量误差 $\Delta N=N-N_0$.

ΔN 反映的是测量值偏离真值的大小和方向,因而称为测量的绝对误差. 把 $E_r=\dfrac{\Delta N}{N}\times 100\%$ 称为测量的相对误差. 显然,绝对误差与相对误差的大小,反映了测量结果的精确程度.

(二) 误差的分类

根据误差的性质及产生的原因,可将误差分为系统误差、随机误差和过失误差三种. 实验数据中,三种误差是混杂在一起出现的,但必须分别讨论其规律,以便采取相应的措施去减少它.

1. 系统误差

在同一条件下多次测量同一量时,符号和绝对值保持不变或按某一确定的规律变化的误差. 这种误差,在测量过程中对结果的影响总是朝着一个方向偏离,其大小不变或按一定规律变化.

(1) 系统误差来源

① 仪器误差:所用量具或装置的不完善,仪器的固有缺陷或未按规定条件使用而引起的误差. 如刻度不准,零点未调好,砝码未校准,天平不等臂,在 20℃下标定的标准电阻而在 30℃下使用等.

② 方法误差(理论误差):实验原理不够完善,测量理论公式带有近似性,实验条件不能达到理论公式所规定的要求,测量方法不完善或因对影响实验结果的某些因素不清楚而引起的误差. 如用单摆测周期,其理论公式成立的条件是摆角趋于零,而在实验测定周期时,又必然要求有一定的摆角,再加上公式中未考虑空气浮力和摆线质量影响因素,这就决定了测量结果必然有误差.

③ 环境误差:外界环境条件如光照、温度、电磁场、压强等规律变化的影响而引起的

误差.如环境温度随时间而升高.

④ 个人误差:观察者生理或心理特点以及不良习惯或偏向而引起的误差.如使用停表时常常超前或滞后,读仪器刻度时常常偏高或偏低.

系统误差经常是一些实验测量的主要误差来源.由于它的出现一般都有较明显的原因,也都有某种确定的规律,因此在设计实验时应设法考虑减小或消除它的影响;而且在实验前还应对测量中可能产生的系统误差加以充分的分析和估计,并采取适当的措施使之降低到可忽略的程度;做完实验后应设法估计未能消除的系统误差之值,对测量结果加以修正.分析系统误差应当是实验的讨论问题之一.

(2) 消除系统误差的一些方法

① 对换法:将测量中的某些条件如被测物的位置相互交换,使产生系统误差的原因对测量结果起反作用,从而抵消了系统误差.如用复称法称物体质量,用滑线电桥测电阻时被测电阻与标准电阻交换位置等.

② 仪器对比法:将仪器或仪表的示值引入修正值,这是用准确度级别高的仪器作对比进行修正的.如用两个电流表接入同一电路,读数不一致,若其中一个是标准表,即可找出修正值了.

③ 改变测量方法:如将电流反向进行读数,在增加砝码与减少砝码过程中读数,在度盘上相隔 180°的两个游标上读数等.

2. 随机误差

在同一条件下多次测量同一量时,测得值总是有稍许差异且变化不定,并在消除系统误差之后依然如此.这种绝对值和符号以不可预定方式经常变化着的误差,称为随机误差.随机误差的大小和方向不定,时大、时小,时正、时负,完全是随机的.初看显得毫无规律,但当测量次数足够多时,可以发现它具有内在的规律性,即统计规律.这种规律可归纳为如下几点:

① 单峰性.绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会多.

② 有界性.绝对值很大的误差出现的概率趋近于零,即误差有一定的实际限度,它不会超出一定的范围.

③ 对称性.绝对值相等的正、负误差出现的概率相等.

④ 抵偿性.误差的算术平均值随着测量次数的增加而逐渐接近于零,当测量次数为无穷大时,误差的算术平均值为零.

(1) 随机误差的分布函数

对某一物理量进行 k 次等精度测量,得出:$N_1,N_2,N_3,\cdots,N_k$.

令该物理量的真值为 N_0,则对应的误差为:$\Delta N_1,\Delta N_2,\Delta N_3,\cdots,\Delta N_k$.当 k 很大时,其误差的分布函数可证明为

$$f(\Delta N)=\frac{h}{\sqrt{\pi}}\exp(-h^2\Delta N^2)$$

上式称为随机误差的正态分布定律或高斯分布定律,其中 h 是一常数,叫做精密度指数.

$f(\Delta N)$对应的曲线为正态分布曲线或高斯曲线.如图 1.2.1 所示.该曲线表示的是测量值误差的分布情况,即单位误差范围内出现的误差概率.曲线下阴影部分的面积

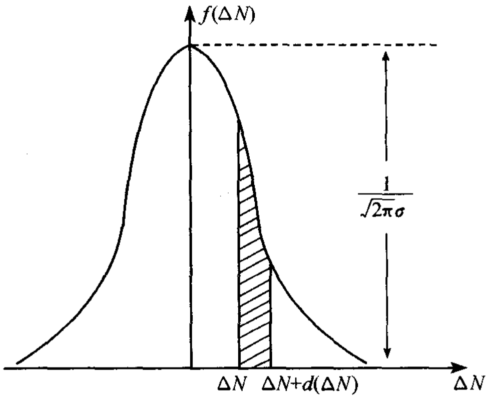

图 1.2.1

$f(\Delta N)d(\Delta N)$，就是误差出现在 ΔN 至 $\Delta N+d(\Delta N)$ 区内的概率.

还可证明 $\sigma=\frac{1}{\sqrt{2}h}$，$\sigma$ 是一个取决于具体测量条件的常数，即称标准误差. 于是

$$f(\Delta N)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left(-\frac{\Delta N^2}{2\sigma^2}\right)$$

由误差分布曲线可见，曲线的中部曲率向下，曲线的两侧曲率向上，故曲线上必有转折点. 容易证明，该转折点的横坐标值 $\Delta N=\pm\sigma$.

当 $\Delta N=0$ 时，由上式得

$$f(0)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$$

显然，某次测量若 σ 很小，则必有 $f(0)$ 很大，分布曲线中部将上升较高，两旁下降就越快，表示测量离散性小，精密度高. 相反，若 σ 很大，则 $f(0)$ 就很小，误差分布的范围就较宽，说明测量的离散性大，精密度低. 如图 1.2.2 所示.

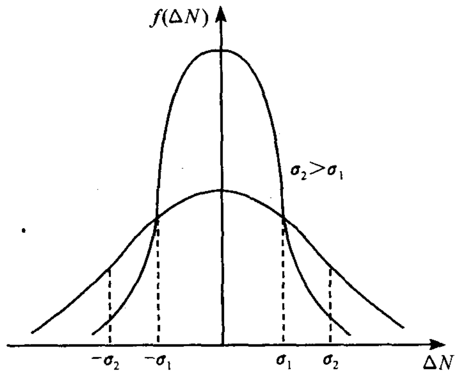

图 1.2.2

(2) 随机误差可能的来源

随机误差的产生是测量过程中许多偶然的或不确定的因素引起的. 例如，人们感官的分辨能力不尽相同，表现为每个人的估读能力不一致，因而出现各次观察时目的物对得不准，调节平衡时平衡点定得不准，读数不准确等；外界环境的干扰，诸如温度不均匀，无规则的振动，气流扰动，电源电压的波动，杂散电磁场的干扰以及湿度、噪声的影响等. 这些因素的影响一般是微小的、混杂的而且是随机出现的，因此难以确定某个因素产生具体影响的大小. 所以一般不易像对待系统误差那样寻出原因加以排除. 显然，随机误差一般既无法预知，又难以控制和估量，因而在测量过程中它的出现带有某种必然性和不可避免性.

3. 过失误差(粗大误差)

凡是用测量时的客观条件不能解释为合理的那些明显歪曲实验结果的误差称为过失误差. 这种误差是由观测者在观测、记录和整理数据过程中，由于缺乏经验，粗心大意，过度疲劳，操作不当等原因引起的一种差错. 例如：实验方法不合理，使用仪器方法不正确，看错刻度，读错数字，错记数据，计算错误等. 带有过失误差的数据称为坏值或异常值，含有坏值的测量结果是完全无效的，我们应当将其剔除. 有的坏值经过分析肯定为不合理的可以废弃，其余的可以根据误差理论定出的取舍准则决定取舍.

此误差无规则可寻，但只要认真地做好测量准备，专心地进行观测、读数和记录等，是

可以避免的.

三、常用的对测量结果评价的三个概念

1. 精密度

表示测量结果中随机误差大小的程度. 它反映了重复测量所得结果的离散程度. 所谓测量的精密度高,就是指测量的重复性好,测量数据比较集中,即随机误差小,但系统误差的大小不明确.

2. 准确度

表示测量结果中系统误差大小的程度. 它反映了测量值与真值符合的程度. 所谓测量的准确度高,就是指测量数据的平均值偏离真值的程度小,即系统误差小,但随机误差的大小不明确.

3. 精确度

是测量结果中系统误差与随机误差的综合评定. 它表示测量值与真值的一致程度. 所谓测量的精确度高,就是指测量数据比较集中在真值附近,即系统误差与随机误差都比较小. 在科学实验中,总希望提高测量的精确度. 精确度又常常简称为"精度".

第三节　随机误差的估计

前已谈到,误差等于测量值与真值之差. 因真值不能确定,故误差也只能估计. 下面的讨论中,我们约定系统误差和过失误差已消除或修正,只剩下随机误差.

一、直接测量的误差估计

(一) 单次测量的误差

有许多待测量不可能进行多次重复测量,也有不少待测量能一次精确地测定,没有必要多次重复测量. 总言之,在实验中常常由于条件不许可,或测量精度要求不高,或在间接测量中其中某一物理量的误差对最后的结果影响较小等原因,对一个物理量的测量只进行或可以进行一次. 对于单次测量的误差 ,因为实验时的状况不同,很难确定统一的规定. 但一般情况下是根据仪器的最小分度和当时测量的具体条件去估计的. 若测量值的随机误差很小,则可按注明的仪器误差作为单次测量的误差. 若没有注明,可取仪器的最小分度或最小分度的一半作为单次测量的误差. 例如:

① 用米尺测摆线长,若米尺使用正确,则读数误差是主要的,因此可取 0.5mm 或 1mm 的测量误差.

② 用停表测一物体运动的时间间隔,若停表的系统误差不必考虑,则测量误差主要是由启动和制动停表时手的动作和目测的协调情况决定的,一般可估计启动、制动时各有 0.1s 误差,总的误差为 0.2s.

③ 用天平称衡物体质量时,空载时和加负载后天平指针的停点一般是不一致的,其差异将引起测量误差. 当二停点差不超过一分度时,可取天平感量为测量误差.

对于单次测量中的标准误差一般用仪器最小分度值的$\sqrt{\frac{1}{3}}$来计算.

（二）多次测量的误差

由随机误差的统计规律及其正态分布曲线可知，测量值的随机误差有正有负，相加后可抵消一部分，而且测量次数越多相消的机会越多. 由此可见，在确定的测量条件下，减少测量结果的随机误差的方法是增加测量次数. 但必须注意，测量次数并不是越多越好. 因为讨论随机误差的前提是等精度测量，而增加测量次数必定要延长测量时间，这将给保持稳定的测量条件增加困难. 同时延长时间也会给观测者带来疲劳，这有可能引起较大的观测误差. 另外增加测量次数只能对降低随机误差有利，而与系统误差的减小无关，所以在实际测量中，测量次数不必过多. 一般在科学研究中取 10 到 20 次，而在基础实验中则只取 3～10 次.

1. 算术平均值

在一定条件下，对某一被测量 N 进行 k 次测量，其测量值为 $N_1, N_2, \cdots, N_k$，则算术平均值为

$$\overline{N} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} N_i \tag{1.3.1}$$

设 k 次测量值的误差分别为 $\Delta N_1, \Delta N_2, \cdots, \Delta N_k$，真值为 N_0，则各次的测量误差为

$$\left.\begin{aligned} N_1 - N_0 &= \Delta N_1 \\ N_2 - N_0 &= \Delta N_2 \\ &\cdots\cdots \\ N_k - N_0 &= \Delta N_k \end{aligned}\right\} \tag{1.3.2}$$

将各式相加，得

$$\sum_{i=1}^{k}(N_i - N_0) = \sum_{i=1}^{k}\Delta N_i$$

即

$$\sum_{i=1}^{k} N_i - kN_0 = \sum_{i=1}^{k}\Delta N_i \tag{1.3.3}$$

于是

$$\frac{\sum_{i=1}^{k} N_i}{k} - N_0 = \frac{\sum_{i=1}^{k}\Delta N_i}{k} \tag{1.3.4}$$

根据随机误差的性质，当 $k \to \infty$ 时，$\dfrac{\sum_{i=1}^{k}\Delta N_i}{k} \to 0$，则 $\overline{N} = \dfrac{\sum_{i=1}^{k} N_i}{k} \to N_0$. 而实际上不可能使测量次数无限增多，因此 $\dfrac{\sum_{i=1}^{k}\Delta N_i}{k} \neq 0$，而且是未知数，所以在有限次测量时不能求出真值. 但此时算术平均值比取任何一个测定值作为真值的最佳值更有把握，因而把算术平均值作为直接测量的最佳近似值，简称最佳值.

2. 标准误差(均方误差)

(1) 测量列的标准误差

测量列是指一组等精度测量值. 我们不能具体指出其中某一个测量值随机误差的实际大小,而只能探讨随机误差以多大的可能性出现在某一范围内. 测量列的标准误差是表示测量列中任一测量值的精密度.

各测量值随机误差平方和的平均值的平方根称为测量列的标准误差. 若测量列的随机误差为(N_1-N_0),(N_2-N_0),…,(N_k-N_0),则标准误差σ为

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k}(N_i-N_0)^2}{k}} \tag{1.3.5}$$

按随机误差理论,标准误差的意义是:测量列中任一测量值的误差落在$\pm\sigma$范围内的概率为68.3%.

实际中,因不能得知真值,故测量值的随机误差也无法确定. 实验时可用平均值替代真值,即得测量值与平均值之差称为偏差(或称残差). 由于平均值最接近真值,因此偏差也就很接近误差,这样我们就不去区分偏差与误差的细微区别,因而可以用偏差来表示误差.

可以证明,测量列的标准误差用偏差表示为

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k}(N_i-\overline{N})^2}{k-1}} \tag{1.3.6}$$

(2) 算术平均值的标准误差

由式(1.3.4)可知,算术平均值的误差等于各测量值随机误差的平均值. 由于测量值的随机误差在平均后要消去一些,因此用算术平均值表示被测量值的可靠性要比用其中任一个测量值表示被测量值的可靠性高. 算术平均值的标准误差应比测量列的标准误差小. 理论分析表明,k次测量结果的算术平均值$\overline{N}$的标准误差表示为

$$\sigma_{\overline{N}}=\frac{\sigma}{\sqrt{k}} \tag{1.3.7}$$

算术平均值的标准误差反应了算术平均值接近真值的程度,它的意义是:在$\overline{N}\pm\sigma_{\overline{N}}$范围内包含真值的概率为68.3%.

用偏差计算算术平均值的标准误差的公式为

$$\sigma_{\overline{N}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k}(N_i-\overline{N})^2}{k(k-1)}} \tag{1.3.8}$$

由式(1.3.7)可知,增加测量次数对于提高测量结果的精密度是有利的. 然而,由于$\sigma_{\overline{N}}$与$\sqrt{k}$成反比,所以$\sigma_{\overline{N}}$的下降速率比k的增长速率慢得多,因此k不必取得过多. 在物理实验课中,一般取4～10次就可以了. 但k如果取得过少,测量数据将严重偏离正态分布.

3. 极限误差

对于标准误差为 σ 的测量，根据误差理论可知，测量列的误差落在 $\pm\sigma$ 区间内的可能性为 68.3%，落在此区间外的可能性为 31.7%；落在 $\pm 2\sigma$ 区间内的可能性为 95.5%，在此区间外的可能性为 4.5%；落在 $\pm 3\sigma$ 区间内的可能性为 99.7%，在此区间外的可能性为 0.3%. 显然，在 10 次左右的测量中，超过 $\pm 3\sigma$ 的只有 0.03 次，几乎没有. 对被测量的任何一次测量值，其误差大于 3σ 的可能性几乎不存在，因而一般将 3σ 称为极限误差. 在物理实验中用极限误差与各次测量的偏差进行比较，若发现某偏差大于极限误差，则它所对应的测量值在测量过程中拟有过失误差存在，应予舍弃.

但一般来说，若测量次数较少($k \leqslant 10$)，用极限误差作为鉴别标准而剔不出过失误差，肖维勒采用了比较合理的剔除过失误差的标准，即肖维勒总则. 肖维勒总则认为，对于相同精度相互独立测量列的数据，若测量值 N_i 满足 $|N_i - \overline{N}| > n\sigma$ 时，则 N_i 就存在过失误差，应在测量列中剔除它. n 值与测量次数有关，可查阅表 1.3.1. 由表可知，3σ 作为极限误差时需要测量 200 次左右. 测量次数越少，n 值也越小，测量值允许的范围也越小.

表 1.3.1　n 值与测量次数 k 的关系

k	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
n	1.38	1.53	1.65	1.73	1.80	1.86	1.92	1.96	2.00	2.03
k	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
n	2.07	2.10	2.13	2.15	2.17	2.20	2.22	2.24	2.26	2.28
k	23	24	25	30	40	50	75	100	200	
n	2.30	2.31	2.33	2.39	2.49	2.58	2.71	2.81	3.02	

4. 算术平均误差(平均绝对误差)

取各个测量值误差的绝对值的平均值称为算术平均误差，即

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^{k} |N_i - N_0|}{k} \tag{1.3.9}$$

如用偏差表示，则

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^{k} |N_i - \overline{N}|}{\sqrt{k(k-1)}} \tag{1.3.10}$$

但通常不使用此式，而用近似式

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^{k} |N_i - \overline{N}|}{k} \tag{1.3.11}$$

按随机误差理论，算术平均误差的意义是：测量列中任一测量值的误差落在 $\pm\delta$ 范围内的概率为 57.5%.

算术平均误差可以表示出测量数据分散的情况，值越大，说明测量值越分散，测量的精密度越小. 用算术平均误差说明算术平均值误差的情况时，大体上表示误差范围，