

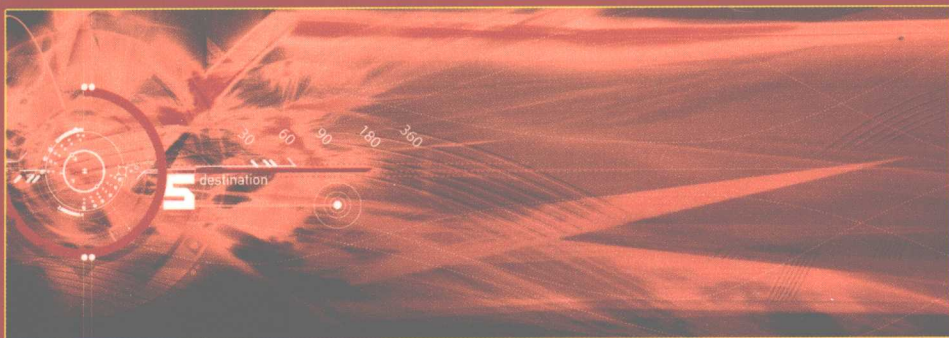


21世纪高等院校规划教材

新编大学物理实验

主 编 陈早生 任才贵 艾剑锋

副主编 邱万英 王 洵 刘正方



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

21 世纪高等院校规划教材

新编大学物理实验

主 编 陈早生 任才贵 艾剑锋

副主编 邱万英 王 洵 刘正方

中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书是根据教育部颁发的《高等工科大学物理实验课程教学基本要求》编写而成的。

本书系统地介绍了大学物理实验有关的测量误差、数据处理的基本知识,介绍了常用物理实验的基本仪器和知识。本书按照物理实验的改革方案,将实验分成从易到难的四个正式等级,并按等级顺序编排了49个实验(含综合性实验和设计性实验24个)。另外给出了CAI物理实验教学内容和实验中常用的物理常数。

本书适合作为高等工科大学各专业的实验物理课程的教材或教学参考书,也可作为实验技术人员和有关课程教师的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

新编大学物理实验 / 陈早生, 任才贵, 艾剑锋主编.
北京: 中国铁道出版社, 2009. 2
21世纪高等院校规划教材
ISBN 978-7-113-09716-5

I. 新… II. ①陈…②任…③艾… 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(2009)第024165号

书 名: 新编大学物理实验
作 者: 陈早生 任才贵 艾剑锋 主编

策划编辑: 严晓舟 曹莉群
责任编辑: 李小军
封面设计: 付 巍
责任印制: 李 佳

编辑部电话: (010) 63583215
编辑助理: 徐盼欣
封面制作: 白 雪



出版发行: 中国铁道出版社(北京市宣武区右安门西街8号 邮政编码: 100054)
印 刷: 河北省遵化市胶印厂
版 次: 2009年3月第1版 2009年3月第1次印刷
开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 19.75 字数: 500千
印 数: 2 000册
书 号: ISBN 978-7-113-09716-5/0·191
定 价: 30.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社计算机图书批销部调换。

前 言

本书根据教育部颁发的《高等工科大学物理实验课程教学基本要求》，结合一般工科大学专业的特点和实验仪器设备的情况，配合物理实验教学改革编写。

为了物理实验教学的改革与创新，本书将实验分成正式级Ⅰ级、正式级Ⅱ级、正式级Ⅲ级、正式级Ⅳ级四个等级。

本书按照分级的顺序编写，全书主要部分为八章，其主要内容及特点如下：

(1) 前三章由浅入深地介绍实验的测量方法、数据处理方法、有关物理实验的基本知识和使用的仪器设备，以方便查阅。

(2) 第四章为正式级Ⅰ级实验项目，其包含一些基本的实验，并涵盖了大多数常用的数据处理方法，主要帮助学生熟悉实验操作规范，学会数据处理及实验报告的写作方法，并掌握一些基本的实验知识和技能，为以后的进一步学习打下坚实的实验基础。

(3) 第五、六章为正式级Ⅱ级和Ⅲ级实验项目，这是实验的主要阶段，也是向正式级Ⅳ级的一个过渡。这两章注重对学生实验动手能力、创新能力的培养和科学求证精神的树立，因此在进行这两级实验时，教师须引导学生对实验中所遇到的问题进行独立思考，并鼓励学生提出一些创造性的观点与方法。

(4) 第七章为正式级Ⅳ级实验项目，是正式级实验的最高阶段，是学生将所学的知识用于解决实际问题的锻炼。它由若干个开放设计性实验项目组成，主要由学生独立完成。

(5) 每个实验都有预习思考题和习题，供学生在实验不同阶段思考和分析，帮助学生加深对实验的理解，巩固所学的知识内容。

本书是在华东交通大学物理教研室全体教师共同努力下完成的。陈早生、任才贵、艾剑锋任主编，邱万英、王洵、刘正方任副主编。参加本书编写的有：陈早生、任才贵、艾剑锋、邱万英、王洵、刘正方、伍清萍、朱莉华、熊狂炜、余萍等，最后由陈早生订正统稿。本书在编写过程中得到了黄克林、陈爱喜等的大力支持，其他教师对实验的内容也提出了许多有益的建议。在此一并致以诚挚的谢意。

本书在编写过程中参阅了许多兄弟院校的教材和仪器（特别是新仪器）厂家的说明书，在此致以深深的谢意。

由于编者水平有限，书中难免会有缺漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

2008年11月

目 录

第 0 章 绪论	1
第 1 章 测量与误差	3
第一节 测量	3
第二节 误差	4
第三节 不确定度	9
第 2 章 有效数字与数据处理	16
第一节 有效数字	16
第二节 数据处理	18
第 3 章 物理实验基本知识和基本仪器	25
第一节 力学、热学基本仪器	25
第二节 电磁学基本仪器	34
第三节 光源与光学仪器	47
第 4 章 I 级实验项目	59
实验 1 固体密度的测量	59
实验 2 重力加速度的研究	65
实验 3 金属丝杨氏模量的测量	71
实验 4 驻波法测波速	76
实验 5 气垫导轨上的实验	82
实验 6 单臂电桥法测电阻	89
实验 7 示波器的原理与使用	94
实验 8 双臂电桥测低电阻	102
实验 9 螺线管磁场的测量	106
实验 10 用转动仪测转动惯量	111
实验 11 气体比热容比的测定	116
实验 12 静电场的测绘	119
实验 13 电表的改装与校正	125
第 5 章 II 级实验项目	130
实验 14 电阻元件的伏安特性	130
实验 15 电位差计的原理与使用	135
实验 16 光栅的衍射	140
实验 17 光的偏振研究	144

实验 18	电子荷质比的测量	150
实验 19	灵敏电流计的研究	159
实验 20	不良导体导热系数的测定	166
实验 21	落球法测黏滞系数	171
实验 22	固体线热膨胀系数的测定	173
实验 23	水的表面张力系数的测定	177
实验 24	分光计的调整及使用	180
实验 25	用牛顿环测量球面的曲率半径	187
第 6 章	III级实验项目	193
实验 26	夫兰克—赫兹实验	193
实验 27	密立根油滴实验	197
实验 28	霍尔效应测磁场	203
实验 29	单缝衍射的相对光强分布	210
实验 30	薄透镜焦距的测定	214
实验 31	光电效应测普朗克常数	221
实验 32	迈克尔逊干涉仪的调整和使用	225
实验 33	金属电子逸出功的测定	230
实验 34	铁磁材料的磁化曲线与磁滞回线	236
实验 35	红外传感实验	241
实验 36	摄影技术	247
实验 37	全息照相	251
实验 38	多光束干涉和法布里—珀罗干涉仪	255
实验 39	阿贝成像原理和空间滤波	261
实验 40	光谱测量与光谱分析	269
第 7 章	IV级实验项目	277
实验 41	刚体转动惯量的研究	278
实验 42	欧姆表的制作	280
实验 43	滑线变阻器特性的研究	282
实验 44	乱团漆包线电阻率的测定	284
实验 45	单摆法测定重力加速度	285
实验 46	简谐振动的研究	287
实验 47	硅光电池特性的研究	289
实验 48	折射率的测定	291
实验 49	细丝直径的测量	292
第 8 章	开放性实验综合管理系统简介与 CAI 物理实验教学	295
附录	301
参考文献	310

第0章 | 绪 论

物理实验是工院校学生必修的一门公共主干基础课程,是学生入学进行一系列实验训练的开端。它是大学生系统学习科学实验知识和技能的开端,通过对它的学习可以培养学生用实验手段发现、观察、分析物理问题的能力。因此,学好物理实验对于高等理工院校的学生是十分重要的。

物理实验是一门独立开设的实验课程,单独开课,单独考核、记分(与其他实验课不同),考核不合格者补考,再不合格就会影响毕业。

1. 物理实验课的任务

物理学是实验科学,因此掌握物理实验的知识、方法、技能,对于理工科学生而言是完全必要的。本课程的具体任务是:

(1) 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,通过理论和实践的结合来加深对物理学理论的理解。

(2) 培养与提高学生的科学实验能力,首先进行系统的实验理论教育,然后进行实验方法、实验技能和科学实验创新性的训练。其中包括:

- ① 通过阅读实验教材或资料,能够理解其中的内容并做好实验前的准备工作。
- ② 借助教材或仪器说明书,能够正确调整和使用相关的实验仪器。
- ③ 正确观察实验现象,对实验现象及实验中的问题能够进行初步的分析和判断。
- ④ 能够正确记录和处理实验数据。
- ⑤ 根据处理好的数据和相关曲线,能够分析误差并写出规范、合格的实验报告。
- ⑥ 简单的设计能力:能够完成简单的具有设计性内容的实验。

(3) 培养与提高学生的科学素养。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风,一丝不苟、严肃认真的工作态度,遵章守纪、爱护公物的优良品德。

2. 物理实验课的重要环节

为了达到物理实验课的目的,下面三个环节是特别重要的,每个学生必须扎扎实实地学习和训练。现分别介绍这三个环节。

(1) 实验预习。预习主要有两种方式,一种是阅读实验教材和相关书籍,另一种是在计算机上进行预习实验和仿真实验。通过预习应该达到:

- ① 明确实验目的和任务。
- ② 弄懂实验原理(如实验的基本思想、公式、电路图、光路图)和实验条件。
- ③ 初步了解主要仪器的调节、使用和操作要点。
- ④ 搞清楚并熟悉实验步骤和注意事项。

⑤ 在做好以上四点的基础上写好预习报告和数据记录表格。

(2) 课堂实验。

① 在课堂上教师作指导性讲解，学生应注意听讲，特别要注意黑板上强调的指导内容、实验要求以及注意事项，必要时应作记录。

② 进一步熟悉仪器，切实掌握仪器的正确使用。然后，依照拟定的实验步骤，独立地实施操作，认真观察物理现象，随时注意仪器设备的工作情况，当发现异常现象或故障时，应立即断开电源终止实验，及时向教师报告，经妥善处理，方可继续实验。

③ 在记录数据时一定要完整、清晰、准确，要尽可能地反映测量的最高精确程度，不允许无谓地丢失有效数字位数。如有记错或重做测量时，不要将原来记录涂涂改改，而是将记录用“×”号或“方框”标注以表示记录无效，更改后的数据应记录在清晰的空位上，或另画表格记录。

记录要实事求是，不允许弄虚作假，不允许抄袭别人的记录。测试完毕后，将数据记录交指导教师签字认可。然后，整理实验仪器，在实验记录本登记后方可离开。

(3) 写好实验报告。实验报告是实验结果的书面总结。实验报告的写作一般包括两部分内容：一是继续完善预习报告；二是做好测试报告。测试报告的工作内容有：记录实验设备型号和编号、填写数据表格、进行数据处理（计算平均值和误差、画图表等）、测试结果的表示以及实验的分析讨论（误差的原因分析、改进建议、心得体会等）。

第 1 章 测量与误差

大学物理实验需要完成两个方面的任务：一是定性地观察物理现象和实验变化过程；二是定量地测量物理量并确定多个物理量之间的关系。测量必然会产生误差，而误差的存在与误差的大小将直接影响测量效果；要确定物理量之间的关系必须通过对数据进行处理才能完成。因此，研究误差与数据处理是物理实验必不可少的环节。

误差与数据处理作为一门学科，包含的内容很多，又比较繁杂，其理论基础是概率论与数理统计。本书将介绍一些常用的误差与数据处理的初步知识。

第一节 测量

一、测量的含义

测量是人类认识和改造客观世界的一种重要手段。在物理实验中，特别是在定量研究中，测量是必不可少的。

1. 测量

测量就是将待测物理量与被选作计量标准的同类物理量进行比较，并得出其倍数的过程。倍数称为待测物理量的数值，被选作的计量标准称为单位，因此，一个物理量的测量值应由数值和单位两部分组成，缺一不可。

2. 单位

按照中华人民共和国法定计量单位的规定，物理量单位均是以国际单位制（SI）为基础的，其中米（长度）、千克（质量）、秒（时间）、安培（电流）、开尔文（热力学温度）、摩尔（物质的量）和坎德拉（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，称为导出单位。

在完成一个测量时，必须明确测量对象、测量单位、测量方法和测量准确度，通常把这四点称为测量的四要素。

二、测量的分类

在科学实验中存在各种类型的测量，我们可以从不同的角度对测量进行分类。按获得数据方法的不同可分为直接测量和间接测量；按测量条件的不同可分为等精度测量和非等精度测量。

1. 直接测量和间接测量

(1) 直接测量。直接用计量标准单位与待测量进行比较并从计量仪器上得到测量值的，称为

直接测量。相应的物理量称为直接测得量。例如，用米尺测物体的长度，用天平和砝码测物体的质量，用电流表测线路中的电流，用直流电桥测电阻数值，等等。

(2) 间接测量。有些物理量很难通过仪器直接读数得到测量结果，但通过一些方法或找到这个量与某些能进行直接测量的量之间的函数关系（公式），就能算出被测量的大小，这种测量称为间接测量。例如，测量一个圆柱体的体积，就可利用公式（函数关系） $V=\pi R^2 h$ ，在用米尺或游标卡尺等测长仪器直接测出半径 R 和高 h 后，代入公式中计算得到 V ，通过这种方式进行 V 的测量就是间接测量。

直接测量是基本的，间接测量是大量的；直接测量是简单的，间接测量是复杂的；任何间接测量都是通过直接测量来实现的。一个间接测量量在一定的条件下也可以进行直接测量。例如速度的测量，我们可以直接测出时间 t 和在时间 t 内通过的位移 s ，然后利用公式 $v=s/t$ 得到；也可以通过速度表直接测量得出。直接测量和间接测量也是相对的，例如用伏安法测电阻是间接测量；而用电桥测电阻则是直接测量。随着现代科学技术的迅速发展，复杂的间接测量正被相对简单的直接测量逐步取代。如利用计算机对各个值进行同时取样、计算后，在屏幕上显示的就是直接测量值。

2. 等精度测量和非等精度测量

在测量过程中，影响测量结果的各种条件不发生改变（多次）测量称为等精度测量；反之，在测量过程中，影响测量结果的各种条件发生了改变的（多次）测量称为非等精度测量。例如，在相同的环境中，由同一个人，在同一台仪器上，采用同样的方法对同一物理量进行多次测量就是等精度测量。显然，它们的可靠程度是相同的，这就是说，对同一物理量进行可靠程度相同的多次测量就是等精度测量。如果在不同的环境中，或由不同人员，或在不同的仪器上，或采用不同的方法，总之在改变测量条件的情况下对同一物理量进行多次测量，其可靠程度是不相同的，即这种测量是非等精度测量。一般非等精度测量是在科学研究、重要的精密测量等工作中，为了获得更可靠的测量结果而采用的，其在数据处理时比较复杂，所以一般情况很少使用。本书要求的都是等精度测量。

第二节 误 差

一、误差的基本知识

1. 真值

任何一个物理量在某一时刻和某一位置或某一状态下，都存在着一个客观值，这个客观值称为真值。真值不随我们的测量方法不同而改变。

2. 绝对误差与相对误差

(1) 绝对误差。测量值与真值之差称为误差。即

$$\Delta x(\text{误差})=x_i(\text{测量值})-x(\text{真值})$$

由于是测量值对真值的绝对偏离，通常把它称为绝对误差。显然，绝对误差除大小外，还有正负。

(2) 相对误差。绝对误差的大小能够反映对同一被测量的测量效果的好与差。例如，对一质

量约为 1 kg 的物体进行测量, 绝对误差为 5 g 的就比为 10 g 的测量效果好; 但对不同的被测量就很难确定了, 例如, 测量质量为 1 kg 的物体的绝对误差是 1 g, 测量质量为 100 g 的物体的绝对误差为 0.5 g, 用绝对误差就不能反映测量效果。为此, 人们引入相对误差的概念。其定义式为

$$E = \Delta x / x \quad (1-1)$$

式 (1-1) 中, E 表示相对误差, Δx 和 x 分别为绝对误差和真值 (一般用算术平均值代替)。由相对误差的大小就可比较两个测量效果的好与差。如以上例子中, 尽管第一次测量的绝对误差比第二次测量的大, 但第一次测量效果比第二次测量效果要好。

3. 误差的分类

产生误差的原因很多, 一般可将误差分为三类: 系统误差、偶然误差和过失误差。

(1) 系统误差。其特点是测量结果始终偏大或偏小, 或按某一规律变化, 但与测量次数无关。这种误差产生的原因是:

① 仪器误差。由仪器本身的不准确性产生的, 如天平不等臂; 光学仪器转动部分的偏心; 标尺刻度不均匀; 仪表机械零点不准, 电零点的漂移等。

② 理论 (方法) 误差。由所用理论的近似性和实验方法的不完善而产生的误差。如力学实验中没有考虑各种摩擦作用; 热学实验中未考虑热量损失; 电路中仪表本身内阻对被测量数据的影响等。

③ 个人误差。由个人习惯与偏向产生的, 如有人读数总是偏高, 有人读数却总是偏低, 如用停表计时等。

系统误差的存在有很大的危害, 必须研究它的规律并尽量将其消除。通常对量具、仪表进行校准; 改进实验方法; 引进修正项等都是消除系统误差的有效办法。在一个实验中, 必须考虑将系统误差消除到可忽略的程度, 为此, 在设计实验时应加以考虑, 作完实验后应作估计。

(2) 偶然误差。其特点是它有随机性, 故又称随机误差。它的误差是不可预知的, 若对同一量重复测量若干次, 每次测得数值一般都不一样, 有的偏大, 有的偏小。产生的原因是由于人的感觉器官 (听觉、视觉、触觉) 灵敏程度有限, 周围环境的干扰以及随测量量而来的其他不可预测的偶然因素, 如实验者对仪表的指示值观测不准确, 操作仪器不稳定; 外界的振动; 电压的波动; 温度不均匀; 杂散的电磁场; 噪声等都能引起测量结果的无序变化。

偶然误差是无法控制的, 也无法从实验中完全消除, 但它服从统计规律 (见图 1-1), 如果对一物理量重复测量多次, 求其算术平均值, 便可达到减少偶然误差的目的。

(3) 过失误差属人为误差。由于测量者粗心、缺乏经验、实验方法不当、疲劳等原因, 读数、记数错误; 随意改变了实验条件或观测记录有遗漏; 或在量具、仪表的安装不合要求的情况下测出数据。这种误差的特点是无一定规律, 误差很明显, 无法理解。有了这种误差, 如果全部数据受到影响, 则全部数据作废, 需重新测试; 个别数据受影响, 则剔除不用。去除这种误差的根本办法是实验者加强责任感, 实验时, 认真细致, 对所测量数据注意审核。实验完毕交指导教师审查。每次实验都应避免出现这种差错。

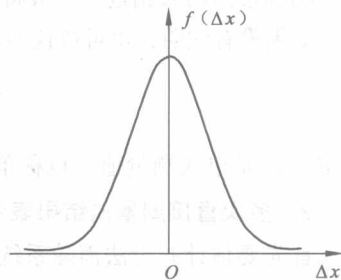


图 1-1 偶然误差的正态分布

4. 测量结果的总体评价

对于测量结果做总体评价时,一般均应把系统误差和随机误差联系起来看,精密度、准确度和精确度都是评价测量结果好坏的。这些概念的涵义不同,使用时应加以区别。

(1) 精密度。表示测量结果中的随机误差大小的程度,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,用于描述测量重复性高低的,精密度高,即测量数据的重复性好,随机误差较小。

(2) 准确度。表示测量结果中的系统误差大小程度,它是指测量值或实验所得值与真值符合的程度。即描述测量值接近真值的程度,准确度高,即测量结果接近真值的程度好,系统误差小。

(3) 精确度。是测量结果中的系统误差和随机误差的综合,它是指测量结果的重复性及接近真值的程度。对于实验和测量来说,精密度过高准确度不一定高,而准确度高精密度也不一定高,只有精密度和准确度都高时,精确度才高。

现以打靶结果为例来形象地说明三个“度”之间的区别。图 1-2 (a) 表示子弹相互之间比较靠近,但偏离靶心较远,即精密度高而准确度较差;图 1-2 (b) 表示子弹相互之间比较分散,但没有明显的固定偏向,故准确度高而精密度较差;图 1-2 (c) 表示子弹相互之间比较集中,且都接近靶心,精密度和准确度都很好,即精确度高。

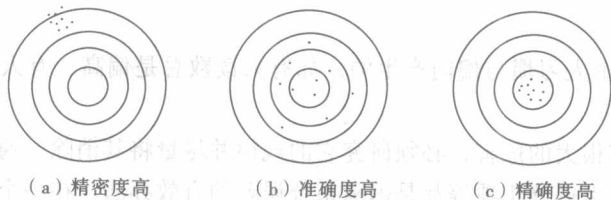


图 1-2 打靶结果

测量误差大即为测量精度低,一般说测量精密度高是指偶然误差小;测量准确度高是指系统误差小,而精确度(有时简称精度)是把两者都包括进去。影响测量结果精确度的主要因素有时是偶然误差,有时是系统误差,有时也可能两者都起作用。对于每项具体测量要进行具体分析,测量结果的总误差是系统误差和偶然误差的总和。

二、误差估算

1. 单次直接测量的结果表示

有的测量不能或不需重复多次测量;或者仪器精度不高,测量条件比较稳定,多次重复测量同一物理量的结果相近。一般将按仪器出厂检定书或仪器上注明的仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 作为单次测量的误差,如果没有注明,也可按仪器最小刻度的一半作为单次测量的误差。单次测量的结果可表示为

$$x = x_{\text{测}} \pm \Delta_{\text{仪}} \quad (\text{单位}) \quad (1-2)$$

或

$$x = x_{\text{测}} \pm \text{仪器最小刻度}/2 \quad (\text{单位}) \quad (1-3)$$

其中, $x_{\text{测}}$ 是单次测量值,也称单次测量最佳值。

2. 多次直接测量的结果表示

首先要估计并设法消除系统误差,只有在系统误差为零或基本消除以后计算偶然误差才有意义。用实验方法消除测量中的偶然误差是不可能的,但是通过多次测量求平均值的方法,可以减少偶然误差对最后结果的影响。

设对某一物理量 x 测量 n 次, 测值分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 则算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-4)$$

由于偶然误差具有统计意义, 测量次数越多, \bar{x} 就越接近其真值, 如果 $n \rightarrow \infty$, 则 \bar{x} 就无限接近于真值, 所以当测量的次数足够多时, 就把 \bar{x} 称为该物理量的最佳值, 或称近真值。所以, \bar{x} 值就作为物理量 x 的测量结果。

(1) 算术平均绝对误差。把各测量值与平均值 \bar{x} 之差代表各测量值的偶然误差。因取其绝对值, 故也称各次测量值的绝对误差, 即 $\Delta x_1 = |x_1 - \bar{x}|$, $\Delta x_2 = |x_2 - \bar{x}|$, \dots , $\Delta x_n = |x_n - \bar{x}|$ 。取它们的算术平均值, 称为算术平均误差, 以 $\overline{\Delta x}$ 表示即

$$\overline{\Delta x} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-5)$$

(2) 标准偏差估计误差。大多数误差都服从正态分布, 利用数理统计理论, 可以得到估计偶然误差的公式。

当测量次数 n 为有限时, 多次测量中任意一次测量值的标准偏差 σ 为

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

把各测量值 x_i 与平均值 \bar{x} 的误差的平方的平均值开方, 称为均方根误差, 即

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n d_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-6)$$

在上述两种误差的计算方法中, 均方根误差与偶然误差理论中的高斯误差分布函数的关系更为直接和简明, 因此在正式的误差分析和计算中, 都采用均方根误差为偶然误差大小的量度, 所以又得到标准误差的名称。

严格地讲, 误差是测量值与真值之差, 而测量值与平均值之差称为偏差, 这两者是有差别的。当测量次数很多时, 多次测量的平均值 \bar{x} 最接近于真值, 因此各次测量值与 \bar{x} 的偏差与就很接近于它们与真值的误差, 这样, 我们就不去区分偏差与误差的细微区别, 分别把均方根偏差称为均方根误差, 把算术平均绝对偏差称为平均绝对误差。

最后, 多次测量的结果表示为

$$x = (\bar{x} \pm \overline{\Delta x}) (\text{单位}) \quad (1-7)$$

$$x = (\bar{x} \pm \sigma) (\text{单位}) \quad (1-7')$$

上述式为测量结果的完整表示, 它包括测量结果 \bar{x} 值, 测量误差 $\pm \overline{\Delta x}$ 或 $\pm \sigma$, 并且 x 值最后一位数应和绝对误差的有效数字所在位对齐, 绝对误差 Δx 或 $\overline{\Delta x}$ 一般只取一位有效数字。

例如, 测量某温度, 共测了五次, 各测值为 $T_1=50.3^\circ\text{C}$, $T_2=50.4^\circ\text{C}$, $T_3=50.1^\circ\text{C}$, $T_4=50.2^\circ\text{C}$, $T_5=50.3^\circ\text{C}$, 试表示测量结果。

计算平均值:

$$\begin{aligned} \bar{T} &= (T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5) / 5 \\ &= (50.3 + 50.4 + 50.1 + 50.2 + 50.3) / 5 \text{ } ^\circ\text{C} \\ &= 50.3 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

计算各次测量的绝对误差:

$$\Delta T_1 = |\bar{T} - T_1| = |50.3 - 50.3| \text{ } ^\circ\text{C} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = |\bar{T} - T_2| = |50.4 - 50.3| \text{ } ^\circ\text{C} = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_3 = |\bar{T} - T_3| = |50.1 - 50.3| \text{ } ^\circ\text{C} = 0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_4 = |\bar{T} - T_4| = |50.2 - 50.3| \text{ } ^\circ\text{C} = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_5 = |\bar{T} - T_5| = |50.3 - 50.3| \text{ } ^\circ\text{C} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

测量结果的平均绝对误差:

$$\Delta T = (0 + 0.1 + 0.2 + 0.1 + 0) / 5 \text{ } ^\circ\text{C} = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

测量结果应表示为

$$T = \bar{T} \pm \Delta T = (50.3 \pm 0.1) \text{ } ^\circ\text{C}$$

这表明温度是在 $50.2 \sim 50.4 \text{ } ^\circ\text{C}$ 之间。绝对误差表示测值的起伏程度, 绝对误差一般只取一位有效数字。

(3) 置信概率(置信度)。如果只存在偶然误差而无系统误差(或系统误差已消除), 在得到测量值的平均值 \bar{x} 和平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 后, 是否就可以得到真值 x 等于 $(\bar{x} + S_{\bar{x}})$ 或 $(\bar{x} - S_{\bar{x}})$ 的结论呢? 结果当然是否定的。因为 $S_{\bar{x}}$ 不是一个准确的误差值, 而是一个估计值。那 x 、 \bar{x} 和 $S_{\bar{x}}$ 如何联系起来呢? 可以证明, 它们是通过概率联系起来的, 即真值 x 以一定的概率出现在 $(\bar{x} - S_{\bar{x}}) \sim (\bar{x} + S_{\bar{x}})$ 所组成的范围之内。这个概率经数理统计理论算出, 服从正态分布的是 68.3% (见图 1-3 (a)) (服从均匀分布的是 58%)。这个概率称为“置信概率”或“置信度”。还可证明, 如果取值为 $2S_{\bar{x}}$ 或 $3S_{\bar{x}}$, 则真值出现在 $(\bar{x} - 2S_{\bar{x}}) \sim (\bar{x} + 2S_{\bar{x}})$ 或 $(\bar{x} - 3S_{\bar{x}}) \sim (\bar{x} + 3S_{\bar{x}})$ 范围中的概率分别是 95.4% (见图 1-3 (b)) 和 99.7%。通常把 $S_{\bar{x}}$ 、 $2S_{\bar{x}}$ 、 $3S_{\bar{x}}$ 称为“置信限”, 显然置信限越大, 真值出现在这个范围内的概率越大。当然也不能太大, 太大将会使测量变得无意义。在大多数的工程和计量应用中, 为了保证测量的高效性和可靠性, 一般取 $3S_{\bar{x}}$ 为置信限, 因为这时的置信概率 99.7% 已非常接近于绝对可信的 100%。

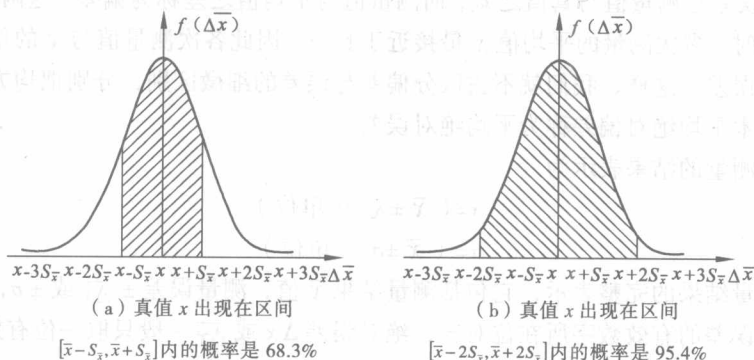


图 1-3 平均值的标准偏差与置信概率的关系

(4) 坏数据的剔除。实验中对一个物理量进行多次测量, 由于某种原因, 有时会混入少量的“坏数据”, 这些坏数据与正常的测量数据相差很大, 必须剔除, 否则会影响测量的准确度。但坏数据的判断与剔除不能靠主观臆断, 必须有客观可靠的依据, 用数理统计的方法可以找出这些依据。下面介绍剔除坏数据的依据——拉依达准则。

置信概率不仅可以把 x 、 \bar{x} 和 $S_{\bar{x}}$ 联系起来, 还可以把测量值 x_i 、平均值 \bar{x} 和任意一次测量值

的标准偏差 S 联系起来。如果置信限取 S , 那么多次测量中任意一次测量值 x_i 落在 $(x-S) \sim (x+S)$ 范围内的概率就是 68.3%; 如果置信限取 $2S$ 和 $3S$, 则在对应范围内 x_i 出现的概率就是 95.4% 和 99.7%。根据这种关系, 当置信限取 $3S$ 时, 就表示多次测量中任意一次测量值不在 $(x-3S) \sim (x+3S)$ 范围内的可能性只有 0.3%。也就是说, 某一次测量值的误差 $(x_i - \bar{x}) \geq 3S$ 的可能性很小, 几乎为零, 如果出现就意味着这个测量值是“坏数据”, 应当剔除。用 $3S$ 作为判据进行坏数据剔除的方法称为拉依达准则。其中 $3S$ 称为极限误差 Δ_{lim} , 可表示为

$$\Delta_{\text{lim}} = 3S \quad (1-8)$$

注意: 拉依达准则是建立在测量次数 $n \rightarrow \infty$ 的前提下的, 当测量次数较少时, $3S$ 判据并不可靠, 特别是 $n \leq 10$ 时不能用该准则剔除坏数据。

如果测量数据中有坏数据, 计算平均值和标准偏差时, 必须把坏数据剔除后再进行计算, 直到得到没有坏数据后的平均值和标准偏差为止。

第三节 不确定度

对有价值的测量结果必须进行评价, 否则测量结果将毫无意义。因此, 如何评价测量质量就是我们必须讨论的问题。

如果不做深入研究, 似乎用误差来评价测量质量是最合适的。因为根据误差的意义, 误差是测量值与真值之差。显然误差大的测量质量就差; 反之测量质量就好。确实, 过去基本上都是用误差来评定测量质量的。但是, 由于真值通常无法得知而使误差无法计算。如果用这个通常无法知道的量去评价测量质量, 显然不很合适。因此, 国际上现在越来越多的地区已不用误差来评价测量质量, 而是用另一个物理概念——不确定度 (σ) 来对测量结果进行质量评价, 也对误差进行评价。我国 1990 年 5 月经审查通过, 并作为国家标准颁布实施的《测量误差及数据处理技术规范》中, 也明确规定测量结果的评定用不确定度而不再用误差。

一、不确定度的概念

实验不确定度, 又称测量不确定度, 简称不确定度。其含义是, 由于误差的存在而被测量值不能确定的程度。它是被测量真值在某一范围内的一个评定。

“不能确定的程度”是通过“量值范围”和“置信概率”来表达的。如果不确定度为 σ , 根据它的含义, 则表示误差将以一定的概念被包含在量值范围 $(-\sigma \sim +\sigma)$ 之中, 或者表示测量值的真值以一定的概率落在量值范围 $(x-\sigma) \sim (x+\sigma)$ 之中。显然, 不确定度的大小反映了测量结果与真值之间的靠近程度。不确定度越小, 测量结果与真值越靠近, 其可靠程度越高, 即测量的质量越高, 其使用价值就越高。由此可见, 用不确定度来评价测量结果的质量比误差评价更合适。

二、不确定度的分类

由于误差来源不同, 一个直接测量量的不确定度会有很多分量, 按获得的方法可把这些分量分为 A 类不确定度和 B 类不确定度。

1. A 类不确定度

凡是可以通过统计方法来计算不确定度的称为 A 类不确定度。由于这一特点, 故又称统计不

确定度,用字母 s 表示。

对某一物理量进行多次测量,由于误差来源不同,可能有若干个 A 类不确定度 $s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n$, 把它们称为 A 类不确定度分量。如果这些分量之间彼此独立,那么分量的“方和根”就是 A 类不确定度 s , 即

$$s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + \dots + s_n^2} \quad (1-9)$$

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, 又称非统计不确定度, 用字母 u 表示。

与 A 类不确定度类似, 由于误差源不同, 一个测量可能存在多个 B 类不确定度 u_1, u_2, \dots, u_n , 把它们称为 B 类不确定度分量。如果这些分量相互独立, 则有

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_n^2} \quad (1-10)$$

在用 A 、 B 两类不确定度来评定测量结果和误差时, 无须再把误差分为偶然误差与系统误差。当然这并不意味着 A 、 B 两类不确定度与偶然误差和系统误差有着完全对应关系。实际上, 偶然误差全部可用 A 类不确定度来评定, 但用 A 类不确定度评定的不都是偶然误差, 系统误差中具有随机性质的都可用 A 类不确定度来评定; 系统误差也不能都用 B 类不确定度来评定, 因为在用不确定度进行误差评定时, 是要把已定系统误差修正后再进行的, 即按 A 、 B 类划分不确定度时, 是不包括已定系统误差的。判别 A 、 B 两类不确定度比判别偶然误差和系统误差容易得多。这种分类弥补了把误差分为偶然误差和系统误差的不足。

三、直接测量不确定度的计算

1. A 类不确定度的计算

对一直接测量量进行多次测量就存在 A 类不确定度, 其计算方法与偶然误差用标准偏差来计算的方法完全相同, 即测量值 x_i 的不确定度为

$$x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-11)$$

平均值 \bar{x} 的不确定度为

$$x_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-12)$$

式中, n 为测量次数。

2. B 类不确定度的估计

(1) 用近似标准差 (u_j) 估计。对于 B 类不确定度, 不能采用统计不确定度计算的方法进行计算, 必须采用其他方法。一般采用等价标准差 (u_j) 的方法计算。用这种方法时, 首先要估计一个“误差极限值” (Δ), 然后确定误差的分布规律 (如正态分布、均匀分布等), 利用关系式

$$\Delta = C u_j \quad (1-13)$$

就可算出近似标准差 u_j , 其中 C 为置信系数, 其值决定于误差分布规律。如对正态分布, $C=3$, 即 $u_j = \Delta/3$; 对均匀分布 $C=\sqrt{3}$, 即 $u_j = \Delta/\sqrt{3}$ 。还有很多分布, 这里就不介绍了。

为了简便,在以后的计算中,我们不考虑它是什么误差分布,都认为是均匀分布,且认为 B 类不确定度只包括实验仪器误差 ($\Delta_{\text{仪}}$) 一个分量,所以置信系数 C 都取为 $\sqrt{3}$, 得到

$$u = \Delta / \sqrt{3} \quad (1-14)$$

(2) 用仪器误差 ($\Delta_{\text{仪}}$) 估计误差极限值 Δ 。由仪器产生的不确定度,一般用仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 来估计误差极限值 Δ , 即 $\Delta = \Delta_{\text{仪}}$ 。

所谓仪器误差,就是在规定使用条件下正确使用仪器时,仪器的示值与被测量的真值之间可能产生的最大误差。通常仪器出厂时要在检定书或仪器中注明仪器误差,不过注明的方式不尽相同,大体有两种情况:

① 在仪器上直接标出或用准确度表示仪器的仪器误差。如标出准确度为 0.05 mm 的游标卡尺,其仪器误差就是 0.05 mm。

② 给出该仪器的准确度级别,然后算出仪器误差。如电表,它的准确度级别是这样规定的:

$$\frac{\text{电表的最大误差 } (\Delta_{\text{仪}})}{\text{电表的量程}} = \text{级别}\% \quad (1-15)$$

如果电表的量程是 100 mA, 经检定的最大误差 ($\Delta_{\text{仪}}$) 是 1 mA, 代入式 (1-15) 中, 有

$$\frac{1}{100} = \text{级别}\% = 1\%$$

就把这只表定为 1 级表。这是出厂时定好的,并标在电表的表盘上。我们在使用此表时,从表盘上读出级别和量程,最大误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 轻而易举地就能算出:

$$\Delta_{\text{仪}} = \text{量程} \times \text{级别}\%$$

如果未注明仪器误差或不清楚时,我们作这样的规定:对能连续读数(能对最小分度下一位进行估计)的仪器,取最小分度的一半作为仪器误差,如米尺、螺旋测微计、移测显微镜等;对于不能连续读数的仪器,以最小分度作为仪器误差,如游标类仪器、数字式仪表等。

(3) 根据实际情况估计误差极限值。对某一物理量进行测量时,由于误差来源不同,相应的不确定度就不止一个。例如,在拉伸法测杨氏模量实验中,用卷(米)尺测金属丝原长时,除卷尺的仪器误差(相应的不确定度 $u_1 / \sqrt{3} = 0.5 \text{ mm} / \sqrt{3} = 0.3 \text{ mm}$)外,还有测量时因卷尺不能准确地对准金属丝两端产生的误差,其相应的 B 类不确定度 (u_2) 中的误差极限值 Δ 就是通过实际情况估计的(实验中根据经验估计合并为 $\Delta_{\text{仪}} = 2 \text{ mm}$, $u_{1\text{实际}} = 2 \text{ mm} / \sqrt{3} = 1.2 \text{ mm}$)。

一般根据实际情况估计误差极限值的 B 类不确定度都比与仪器误差相应的不确定度大很多,特别是单次测量时更是这样,应特别注意。当然单次测量也有优点,即测量效率高,数据处理简单,在实验测量中也经常用到。

3. 合成不确定度

若测量结果含统计不确定度分量与非统计不确定度分量

$$s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_m$$

$$u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_m$$

且它们之间相互独立时,则合成不确定度 σ 的表征为