

大学物理实验

■ 主编 / 倪新蕾

■ 参编 / 梁海生 吴纯英 贝承训 马在光
高亚妮 於黄中 谢江章

华南理工大学出版社

大学物理实验

主 编 倪新蕾
参 编 梁海生 吴纯英 贝承训 马在光
高亚妮 於黄中 谢汇章

华南理工大学出版社
·广州·

内容简介

本书是在华南理工大学物理实验中心近几年物理实验教学内容和课程体系改革的基础上,根据原国家教育委员会《高等工科大学物理实验课程教学基本要求》,结合理工院校专业设置特点和实验室一般情况编写而成。内容包括误差分析与实验数据处理、物理实验的基本方法和常用仪器介绍、基础性实验、综合应用性实验和近代物理实验以及设计性实验。

本书可作为高等学校理工科各专业的物理实验课程教材,也可作为相关教学、研究和实验工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/倪新蕾主编. —广州:华南理工大学出版社,2005.1
ISBN 7-5623-2170-1

I. 大… II. 倪… 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(2004)第 129027 号

总发行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼,邮编 510640)

发行部电话:020-87113487 87111048(传真)

E-mail: scut 202@scut. edu. cn <http://www. scutpress. com. cn>

责任编辑:欧建岸

印刷者:广东省阳江市教育印务公司

开本:787×960 1/16 印张:21 字数:423 千

版次:2005 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

印数:1~5000 册

定价:32.50 元

版权所有 盗版必究

前 言

本书是根据原国家教育委员会颁布的《高等工科学学校物理实验课程教学基本要求》,结合我校近几年来物理实验课程建设和教学改革以及一般物理实验室实验仪器设备的情况编写而成的。

随着科学技术的发展,20世纪70年代末,物理实验从原来的物理课程中分离出来,形成一门独立设置的课程,它注重学生动手能力、综合素质以及创新精神的培养和训练。按照由浅入深、由单一到综合的认识过程,本教材打破按力学、热学、电磁学和光学实验编排的模式,按照基础性实验、综合应用性实验和近代物理实验以及设计性实验的教学要求编写,在第一、二章阐述了实验误差知识和实验数据处理方法以及物理实验的基本方法,并介绍了常用仪器,从而构成一个完整的教材体系。

考虑到物理实验课程的独立性和面向低年级学生的特点,本教材在编写上力求做到实验目的明确,实验原理叙述清楚,实验仪器介绍详细,并在多数实验后附有思考题,引导学生课后进一步分析、讨论、巩固和提高。

实验教学是一项集体性工作。本教材是全体任课教师长期教学实践经验的结晶,多数实验题目都含有许多教师如温坤麟、陈明光、林万荣、马景才、王秋君等老师先后的贡献,。在编写过程中还参阅了许多兄弟院校的教材以及教学仪器厂家提供的资料,从中得到不少启发,在此向他们表示衷心的感谢。

本教材共分五章,由倪新蕾主编。参加编写的有倪新蕾(前言、绪论、第一章、第二章、实验4、20、22、24、25、28、30、31、33、34)、梁海生(实验21、23、29、32、37、第五章)、吴纯英(实验2、6、7、12、14、15)、贝承训(实验1、5、9、10、11、13)、马在光(实验3、8)、高亚妮(实验16、17)、於黄中(实验35、36)、谢汇章(实验18、19)。

由于水平有限,书中难免有疏漏谬误之处,恳请读者批评指正。

编 者

2005年1月于华南理工大学

目 录

绪论	1
第一章 测量误差、不确定度和实验数据处理	3
第一节 测量和测量误差	3
第二节 测量结果的误差估算	7
第三节 测量不确定度表示	15
第四节 有效数字及其运算规则	17
第五节 实验数据处理	21
第六节 系统误差的处理	26
练习题	28
第二章 物理实验的基本方法和常用基本仪器介绍	30
第一节 物理实验的基本方法	30
第二节 常用基本仪器介绍	34
第三章 基础性实验	47
实验 1 薄透镜焦距的测定	47
实验 2 霍尔位置传感器测杨氏模量	52
实验 3 液体粘滞系数的测量及其温度特性研究	58
实验 4 PN 结正向电压温度特性研究	68
实验 5 用电流场模拟静电场、温度场	73
实验 6 惠斯登电桥测电阻	79
实验 7 非平衡电桥电压输出特性研究	85
实验 8 用电位差计校准毫安表级别	89
实验 9 模拟示波器的使用	95
实验 10 数字示波器的使用	107
实验 11 偏振光特性研究	116
实验 12 光的等厚干涉测量	122
实验 13 光的衍射	127
实验 14 分光计的调整与使用	131
第四章 综合应用性实验和近代物理实验	139
实验 15 弦振动(弦音计)	139

实验 16	磁阻效应	144
实验 17	霍尔效应法测磁场	149
实验 18	共振法测量材料的杨氏模量	155
实验 19	铁磁物质的磁滞回线研究	163
实验 20	双光栅测量微弱振动位移	169
实验 21	交流电桥	175
实验 22	超声波在介质中的传播速度的测量	180
实验 23	物质旋光率的测量	186
实验 24	物质磁化率的测量	192
实验 25	费米-狄拉克分布的实验测量	198
实验 26	迈克尔逊干涉仪的调整与使用	204
实验 27	电感传感器的特性研究	210
实验 28	椭圆仪测量薄膜的厚度和折射率	214
实验 29	光栅特性及光波波长测定	221
实验 30	光电效应与普朗克常数的测定	227
实验 31	夫兰克-赫兹实验	231
实验 32	超声光栅及其应用	235
实验 33	全息照相	242
实验 34	阿贝成像原理与空间滤波	248
实验 35	密立根油滴实验	255
实验 36	气体等离子体参量的测量	262
实验 37	光谱测量与光谱分析	271
第五章	设计性实验	285
实验 38	自组显微镜和望远镜	288
实验 39	全息光栅的制作及其参数测量	291
实验 40	多用电表的改装与调试	293
实验 41	非线性元件的特性研究	295
实验 42	温差测量装置的设计与调试	297
实验 43	物质光谱的定性分析和三棱镜折射率随光谱波长变化的 规律研究	299
实验 44	弱电流(电压)的测量	302
实验 45	小功率交流电路的功率测量	304
实验 46	转动速度的测量	307
实验 47	液面位置的测量和控制	308
实验 48	示波器在电磁测量中的应用	310

实验 49 表头参数的测定	313
实验 50 微细线径的测量	314
实验 51 钠光 D 双线波长差的测定	317
实验 52 里德伯常数的测定	319
实验 53 电容量、电感量的测量	320
附表 1 中华人民共和国法定计量单位	322
附表 2 基本物理常量数据表	323
参考文献	328

绪 论

物理学是一门实验科学,物理规律的研究都以严密的实验事实为基础,并且不断受到实验的检验。物理实验不仅在其自身发展中有重要作用,而且对于推动自然科学和工程技术的发展也起着重要作用。物理实验是高等学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课,是学生进入大学后系统地学习实验方法和实验技能的开端,同时,在培养科学工作者的良好素质及科学世界观方面也起着潜移默化的作用。因此,高校学生应认真学好物理实验课,努力掌握科学实验技术,以适应科学技术不断进步和社会主义现代化建设迅速发展的需要。

一、物理实验课的目的

(1)通过对物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量,掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能,加深对物理学原理的理解。

(2)培养和提高学生的科学实验能力。这些能力是指:通过阅读实验教材或参考资料,做好实验前的准备;借助教材或仪器说明书,正确使用基本实验仪器;学会运用物理学理论对实验现象进行初步的分析和判断;正确记录和处理实验数据,分析实验结果,撰写合格的实验报告;能够独立完成教学性的设计性实验。

(3)培养和提高学生从事科学实验的素质:使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;遵守纪律、团结协作和爱护公共财物的优良品德;热爱科学,勇于创新,力戒浮躁,讲究诚信。

二、物理实验课的主要教学环节

物理实验是学生在教师指导下独立进行实验操作和测量的一项实践活动。要有效地学习、完成一个实验,必须遵循以下3个环节。

1. 课前预习

实验前学生必须预习实验教材和仪器说明书等有关资料,明确实验目的,基本弄懂实验原理和实验内容,并对测量仪器和测量方法有所了解,在此基础上写出实验预习报告。报告内容包括实验名称、实验目的、实验仪器、简要实验原理和实验记录表格。

2. 实验过程(调整实验装置,进行测量记录)

操作和测量是实验教学的主要环节。学生进入实验室后应认真听取教师对本实验的要求、重点、难点和注意事项的讲解。开始实验时应先检查仪器设备并简单练习操作,待基本熟悉仪器性能和使用方法后才开始进行实验测量。在实验过程中,要严肃认真,仔细观察物理现象,正确读取和记录测量数据。要学会分析和排除实验故障,若发现问题而无法解决时,应及时向教师或实验管理人员报告,由教师或实验管理人员协助处理。仪器设备调整、操作、测量和记录是科学实验的基本功。实验记录内容应包括:

(1)与实验条件有关的物理量(如室温、气压、相对湿度等);

(2)仪器设备型号、精度等级、允许误差及量程等;

(3)每次测量的物理量数值、有效数字和单位等原始数据。这些原始数据应如实地记录在表格上。若发现记录数据有问题,可以删除或再测量,但绝不允许抄袭或篡改实验数据。

实验完毕,应将记录数据交指导教师审查签名,整理好实验仪器后才能离开实验室。

3. 课后实验总结

实验后要对实验数据及时进行处理,并写出完整的实验报告。实验报告是实验工作的总结,要求用统一印刷的实验报告纸书写,要求字体工整、文理通顺、数据齐全、图表规范、结论明确、纸面整洁。实验报告的格式和内容如下:

(1)实验名称、实验者姓名、实验日期。

(2)实验目的。

(3)实验仪器(注明型号和精度等级)。

(4)实验原理:简要叙述实验原理、计算公式、实验电路图或光路图。

(5)实验内容和主要步骤:简要写出实验内容、步骤和实验注意事项。

(6)数据记录与处理:将原始记录数据转记于实验报告上(签名的原始数据也应附在报告上,以便教师检查),按照实验要求计算测量结果,该作图的要作图,计算要遵循有效数字的运算规则进行,用标准差或不确定度评估测量结果的可靠性。

(7)结果与讨论:这部分要明确给出实验测量结果,并对结果进行讨论,如分析实验中观察到的现象、讨论实验中存在的问题、回答思考题等,也可以对实验本身的设计思想、实验仪器的改进等提出建设性意见。

第一章 测量误差、不确定度和实验数据处理

物理实验离不开物理量的测量。在测量过程中,由于任何测量方法、测量仪器、测量环境和测量人员的观察力等都不可能做到绝对精确,使得测量不可避免地伴随有误差。分析测量中可能产生的各种误差,尽可能消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出估计,这是物理实验中必不可少的一个重要环节。没有测量误差的基本知识,就无法获得正确的测量值,无法正确评价测量结果的可靠性,就不会处理实验数据或者处理数据方法不当,得不到正确的实验结果。本章从实验教学的角度出发,主要介绍测量误差、不确定度的基本知识和常用的实验数据处理方法。

第一节 测量和测量误差

一、测量及其分类

进行物理实验,最重要的就是把要了解的物理量通过实验方法用仪器测量出来。测量就是在一定条件下使用具有计量标准单位的计量仪器对被测物理量进行比较,从而确定被测量的数值和单位。例如,物体长度的测量,可以用具有标准单位标度的米尺与之进行比较而得到其数值和单位。

按获得测量结果的手段不同,可将测量分为直接测量和间接测量。直接测量是使用仪器或量具直接测得被测量的量值的测量。由直接测量所得的物理量,称为直接测量量。例如,用米尺测量物体的长度,用天平测量物体的质量,用秒表测量物体运动的时间等等,都是直接测量。间接测量是通过直接测量量,再根据某一函数关系把待测量计算出来的测量。由于这些待测量还没有直接测量的仪器,需要用间接的方法获得,所以这类测量称为间接测量。例如,用单摆测量某地的重力加速度 g ,是根据直接测得单摆的摆长 l 和周期 T ,再通过单摆公式

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$$

把重力加速度 g 计算出来的, g 称为间接测量量。

按测量条件的异同,测量还可以分为等精度测量和不等精度测量。若对同一个物理量的多次测量都是在相同条件(包括测量方法、使用的仪器、外界环境条件和观察者都不变)下进行的,称为等精度测量;否则,称为不等精度测量。

二、测量误差及其分类

1. 真值、约定真值

任何被测量的物理量在特定条件下都具有客观存在的确定的真实量值,通常称为该物理量的真值,记作 μ 。测量的任务就是要把真值找出来。但在实际测量过程中,由于受到测量仪器、测量方法、测量条件、实验者等种种因素的影响,所有的测量值都不可能是待测量的真值。真值一般是不知道的,也是无法测得的,但在某种情况下可以找到近似真值和理论真值,称为约定真值。

①由国际计量会议约定的值(或公认的值)可以作为近似真值,如基本物理常数、基本单位标准。

②由高一级仪器校验过的计量标准器的量值,也可以作为近似真值。这些高级标准器都是经过逐级校对和各级计量检定系统核准的。

③理论真值是指由理论计算所得的量值,如三角形三个内角和为 180° 、圆周率 π 等。

④在理想条件(无系统误差和无限多次测量)下,多次测量的算术平均值可作为近似真值,或称为真值的最佳估计值。

2. 误差的定义

设某物理量 X 的测量值为 x ,真值为 μ 。则测量值 x 和真值 μ 的差定义为测量误差,记为 Δx ,即

$$\Delta x = x - \mu$$

误差 Δx 有正、负号。 Δx 表示测量值与真值之间的偏离大小和方向,以此衡量测量结果的准确程度。 Δx 又称为绝对误差。

在实际测量条件下,由于待测量的真值不可知,只能取对待测量作多次测量所得的多个测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 作为待测量的近似真值。测量值 x 的测量误差(又称偏差或残差)定义为

$$\Delta x = x - \bar{x}$$

深入分析便可发现,误差 Δx 的大小还不能完全地评价测量结果的准确程度。虽然误差绝对值相等,若被测量本身的大小不同,其准确程度显然是不同的。例如,有两个工件,其长度分别为 1000mm 和 10mm,如果测量误差均为 0.5mm,显然前者的准确程度远大于后者。为了能更好反映测量的准确程度和评价测量结果的可靠性,引入相对误差概念。相对误差定义为绝对误差与真值之比。当误差较小

时,相对误差也可以近似表示为绝对误差与测量值之比。由于相对误差 E 是反映测量的准确程度的,故常用百分数来表示,即

$$E = \frac{\Delta x}{\mu} \times 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

3. 误差的分类

误差的产生有多方面原因,从误差性质、来源和服从的规律来看,可将误差分为系统误差、偶然误差和粗大误差 3 种。

(1)系统误差。系统误差是由于实验系统的原因在测量过程中造成的误差。其特点是误差的大小和符号总是保持恒定,或按一定规律以可约定的方式变化。系统误差来源大致有:

①仪器误差。主要是由于仪器本身的缺陷、灵敏度和分辨能力的限制而产生的。

②方法误差。是由于测量方法不完善以及理论公式的近似性所产生的。

③个人误差。这主要是由于测量人员的分辨能力、感觉器官的不完善和生理变化、固有习惯、反应的快慢等因素引起的误差。例如,有的人在读数时总是偏大或偏小,按动秒表计时总是滞后或提前等。

④环境误差。当测量仪器偏离了规定的条件使用时,例如受气压、温度、湿度、电磁场等发生变化的影响,都会使测量产生误差。

处理系统误差比较复杂,它要求实验者既要有较好的理论基础,又要有丰富的实践经验。在物理实验中,主要考虑由于仪器准确度所限和实验方法、原理不完善而导致的系统误差的处理,根据系统误差的来源,设法消除或减少其影响,对未能消除的未定系统误差可以作为偶然误差处理。如何限制或消除系统误差没有一个普遍适用的方法,只能针对每一个具体情况采取不同的具体措施。

系统误差直接影响测量结果接近真值的程度,因此用“正确度”来表示系统误差的大小。测量结果的正确度高,则表示测量的系统误差小;反之,系统误差大。

(2)偶然误差。偶然误差又称随机误差。实验时在同一条件下对某物理量进行多次测量,由于环境的起伏变化和各種不稳定因素的干扰,使每次测量值总会略有差异(即误差)。测量仪器精度越高就越能反映出这种差异。这种误差的绝对值和符号变化不定,即具有随机性,因此称为偶然误差。

偶然误差的来源是多方面的,主要有:

①环境和实验条件的无规则变化。如电源电压的微小波动、温度和湿度的变化、气流扰动、振动等等。

②观测者的生理分辨能力、感官灵敏度的限制。如读电表示值有时偏大有时偏小,按停表有时快有时慢等。

偶然误差的量值和符号以不可约定的方式变化着,对每次测量值来说,其变化

是无规则的,但对大量测量值,其变化则服从确定的统计分布规律。大部分基础实验测量的偶然误差服从正态分布规律。其特点是:

①单峰性。绝对值小的误差出现的概率大,而绝对值大的误差出现的概率小。

②对称性。绝对值相等的正、负误差出现的概率大致相等。

③有界性。绝对值非常大的正、负误差出现的概率趋于零。

设在相同条件下对某物理量 X 进行 n 次测量,测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

设测量值中无系统误差,则每个测量值的偶然误差为

$$\Delta x_i = x_i - \mu$$

n 次测量的平均误差为

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \bar{x} - \mu$$

由于各测量值的误差有正有负,相加时有部分将相互抵消, n 越大,相互抵消的部分越多,平均值 $\bar{x}$ 的误差 $\overline{\Delta x}$ 就越小。当测量值没有系统误差时,在相同条件下,若测量次数 $n \rightarrow \infty$,则有

$$\overline{\Delta x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0$$

$$\bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i + \mu = \mu$$

由此可见,在相同条件下,增加测量次数可以减少测量结果的偶然误差,并且多个测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 是真值 μ 的最佳估计值。所以,可取多次测量的算术平均值作为待测量的测量结果。

偶然误差反映了该实验测量结果的重复性和离散性,因此用“精密度”来反映偶然误差的大小。测量结果的精密度高,是指对某物理量的多次测量值重复性好,偶然误差小;反之,是指多次测量值之间分散程度大,即重复性差,偶然误差大。

把系统误差和偶然误差综合起来考虑,我们用“准确度”表示,作为对测量结果可靠性的总的评价。

(3)粗大误差。粗大误差是由于观测者粗心大意,或测量条件发生突变,导致明显超出规定条件下预期的误差。粗大误差的特点是误差值很大,且无规律。实验中凡含有粗大误差的测量数据都要按照一定的规则剔除,不能用含有粗大误差的测量数据计算测量结果。显然,只要观测者细心观测,认真读取、记录和处理数据,这种粗大误差是完全可以避免的。

第二节 测量结果的误差估算

本节主要讨论测量量偶然误差的估算,并且是在错误数据已经剔除,系统误差已经消除或系统误差相对于偶然误差小很多的情况下进行的。估算偶然误差常用的有算术平均误差和标准差两种方法。我国采用标准差表示测量的准确度。虽然在普通物理实验中对测量结果的准确度要求不高,但考虑到现代生产实践和科学实验要求能正确地评价测量结果的准确度,因此,完全有必要要求和训练在实验中按照较严格的误差理论来处理实验数据,即用标准差、置信概率和置信限等来评价测量结果的准确度和可靠性。

标准差又称为均方根误差,它是建立在偶然误差统计理论基础上,用以较为合理地估算测量数据列的离散程度和测量结果的可靠性。

采用标准差表示测量准确度,最大的优点是,在理论上,若只计算合成的标准差,则不论各随机误差的概率分布是否相同,只要误差彼此独立,它们共同影响该量总的标准差为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \cdots + \sigma_n^2} \quad (1-2-1)$$

所以国内外普遍采用 σ 值来估算测量误差。

一、直接测量量偶然误差的估算

1. 测量列的标准差

测量列就是指一组测量值。设对某一真值为 μ 的物理量 X 进行 n 次等精度测量(无系统误差或系统误差已修正),得一系列测量值 $x_1, x_2, \cdots, x_n$, 测量列的标准差 σ_s 定义为各测量值误差平方和的平均值的正平方根,即

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (1-2-2)$$

实际上,在实验测量过程中,真值 μ 是未知值,只能以测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 作为待测量 X 的最佳估计值,而且物理实验的测量次数是有限的,通常 3~5 次,因此其偶然误差可以用标准偏差 σ_x 来处理,即

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

式中, $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$, 称为第 i 次测量的偏差或残差。标准偏差与残差的“方和根”成正比, 它是目前国际上处理偶然误差的通用公式。

σ_x 为测量列的标准偏差, 其物理意义是表示该测量列中的测量值的离散程度, 即测量列中的各个测量值相对于测量值的算术平均值的分布情况。标准偏差 σ_x 可以用来对测量列的可靠性进行评估。 σ_x 值小, 测量的偶然误差小, 测量列中的各个测量值分布比较集中, 测量的可靠性就大些; 反之, σ_x 值大, 测量的偶然误差大, 测量值分散, 测量的可靠性就差些。根据偶然误差的统计理论, 测量列的标准偏差为 σ_x , 说明此测量列中的某一测量值 x_i 的实际误差 Δx 落在 $(-\sigma_x, +\sigma_x)$ 区间内的概率为 68.3%。换句话说, 测量列中某一测量值 x_i 有 68.3% 的概率落在 $(\mu - \sigma_x, \mu + \sigma_x)$ 区间内。由此可知, 在测量同一物理量并以相同的测量次数 n 得到几个测量列, 在消除了系统误差之后, σ_x 值小的, 其最佳估计值 $\bar{x}$ 较可靠。

2. 算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差

由标准差求和公式可以推得, 若算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差以 $\sigma_{\bar{x}}$ 表示, 则它与测量列的标准偏差 σ_x 之间的关系为

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

测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差 $\sigma_{\bar{x}}$, 表示该测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 以一定概率落在真值附近的范围。同样, 算术平均值的标准偏差是对测量结果 $\bar{x}$ 的可靠性的估计。当平均值的标准偏差为 $\sigma_{\bar{x}}$ 时, 平均值 $\bar{x}$ 的误差 $\Delta \bar{x}$ 落在 $(-\sigma_{\bar{x}}, +\sigma_{\bar{x}})$ 区间内的概率为 68.3%。由于 $\sigma_{\bar{x}} < \sigma_x$, 可见平均值 $\bar{x}$ 的可靠性大于测量列中任一测量值 x_i , 且 $\sigma_{\bar{x}}$ 值随着测量次数 n 的增大而减少 (并非无限减少), 而使测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 越来越接近待测量的真值。

3. 偶然误差与系统误差的合成

上面从偶然误差统计理论出发讨论了测量列的偶然误差分量。在实验测量中还存在着系统误差。虽然确定的系统误差已在测量列中作出了修正, 但仍不可避免地会存在未定的系统误差分量。这些未定的系统误差分量仍然会影响测量结果的可靠性, 因此, 有必要在测量结果中给出总的标准偏差。

设待测量 X 的测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差为 σ_x (偶然误差分量), 未定的系统误差分量为 σ_d (估计标准差), 根据误差传播定律可求得算术平均值 $\bar{x}$ 的总的标准偏差 σ 为

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

即测量列的算术平均值的总的标准偏差由偶然误差分量和系统误差分量合成得

到。

4. 测量结果的表示

设测量列的算术平均值及其总的标准偏差分别为 $\bar{x}$ 和 σ , 则测量结果可表示为

$$x = \bar{x} \pm \sigma \text{ (单位)} \quad (1-2-6)$$

根据偶然误差统计理论, 式(1-2-6)的物理意义是待测量 X 的真值落在 $(\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma)$ 区间的概率 P 为 68.3%。或

$$x = \bar{x} \pm 2\sigma \quad (P = 95.4\%)$$

$$x = \bar{x} \pm 3\sigma \quad (P = 99.7\%)$$

式中, $\sigma, 2\sigma, 3\sigma$ 为置信区间, 1, 2, 3 为置信因子; P 称为置信概率或置信水平。

5. 异常数据的判别和剔除

在一个测量列中, 误差超出极限值的测量数据, 称为异常数据。它的出现, 往往是由于某种错误或预测不到的环境突变引起的。这些异常数据会歪曲实验或测量结果。为了使测量数据能真实地反映实际情况, 需要有一个鉴别异常数据的科学标准, 用一定的方法鉴别并把异常数据剔除。

鉴别异常数据的基本思想是以一定置信水平确定一个置信限, 凡是超过该限度的误差就认为它不属于偶然误差的范围, 而将对应的数据判为异常数据予以剔除。

剔除一次异常数据之后, 应把余下的数据重新检查, 直到测量列的其他数据都在规定的置信限内, 才使用这些数据计算测量结果。

(1) “3 σ ”准则(也称拉依达准则)

根据偶然误差统计理论, 当测量的标准偏差为 σ 时, 任一测量值的误差落在 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 区间的概率为 99.7%, 而落在 $\pm 3\sigma$ 区间之外的概率仅为 0.3%, 对于有限次的测量来说, 测量值的误差实际上不会超过 3σ , 故称 3σ 为极限误差。在一个测量列中, 如果有某个测量值 x_i 的残差的绝对值大于 3σ , 则可认为该测量值为异常数据而予以剔除。

“3 σ ”准则只适宜于测量次数 n 足够大的场合。当测量次数 n 小于 10 时, 一般不采用“3 σ ”准则去剔除异常数据。

(2) 格拉布斯准则

格拉布斯准则是 1960 年以后才提出的, 是公认可靠性最高的一种异常数据取舍的准则。

设某一服从正态分布的测量列为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 将此测量列按其数值大小由小到大重新排列, 得

$$x'_1 \leq x'_2 \leq x'_3 \leq \dots \leq x'_n$$

格拉布斯导出了 $g_i = \frac{x'_i - \bar{x}}{\sigma_x}$ 的分布: 选定一显著水平 α (亦称为危险率), α 是判为

异常数据的概率,一般取 0.05 或 0.01;对应于某一定的测量次数 n 和显著水平 α ,可得一临界值 $g_0(n, \alpha)$, ($g_0(n, \alpha)$ 数值见表 1-2-1)。若测量列中某一测量值 (通常先取最大值或最小值判断) 的 $g_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x} \geq g_0(n, \alpha)$, 则认为测量值 x_i 为异常数据。

采用格拉布斯准则判别和剔除异常数据的步骤和方法是:

① 计算测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 和标准偏差 σ_x 。

② 根据测量次数 n 和选定的显著水平 α 选取临界值 $g_0(n, \alpha)$ 。

③ 从测量列中选取数值最大或最小的测量值按 $g_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x}$ 计算 g_i 值, 将 g_i 值与 $g_0(n, \alpha)$ 值进行比较, 若 $g_i \geq g_0(n, \alpha)$, 则 x_i 为异常数据; 反之, 为正常数据。

④ 剔除此异常数据后, 对余下的数据重新用格拉布斯准则判别, 直至所有数据都符合要求。

表 1-2-1 $g_0(n, \alpha)$ 数值表

$g_0(n, \alpha)$ n α	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.05	1.45	1.67	1.82	1.94	2.03	2.11	2.18	2.23	2.28
0.01	1.49	1.75	1.94	2.10	2.22	2.32	2.41	2.48	2.55

6. 单次直接测量的标准偏差估算

在科学实验的测量实践中, 特别是教学实验的某些测量, 经常会对某些物理量只作单次测量, 这时应如何估算测量结果的标准偏差? 这是实验数据处理的一个实际问题。作单次测量时, 其测量值的最大误差就是所使用仪器出厂时或经校准时注明的仪器允许误差。若仪器没有标明允许误差, 则一般取仪器分度值的一半作为最大误差。但这里所指的是一种极限误差, 而不是测量值的估计误差, 测量时应当将这种极限误差或允许误差转换为测量值的估计标准差, 使之能合理地给出测量结果的误差范围。通常的转换方法有两种:

① 当仪器的误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 是以 2σ 或 3σ 的相应置信概率给出时, 单次测量值的标准偏差分别为

$$\sigma_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{2} \quad \text{或} \quad \sigma_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{3}$$

② 当仪器只给出误差限或最大允许误差而未给出相应的置信概率时, 可以当