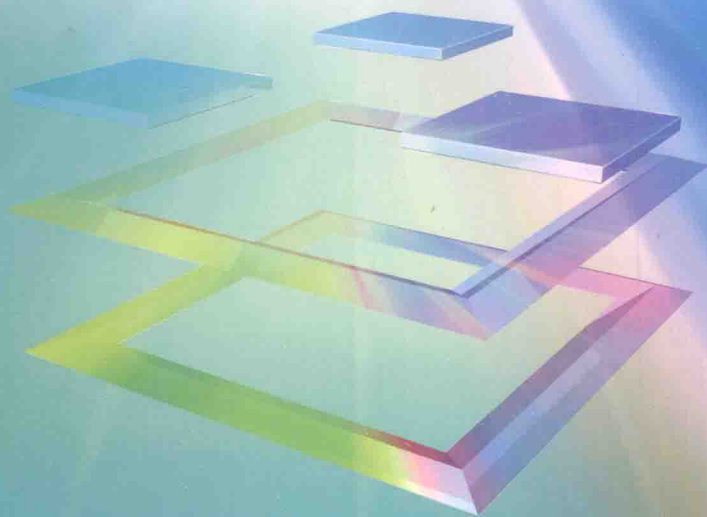


大学 物理实验

主 编◇安文玉 李晓光 何立志
副主编◇安立民 伊 杰 王璞玉



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



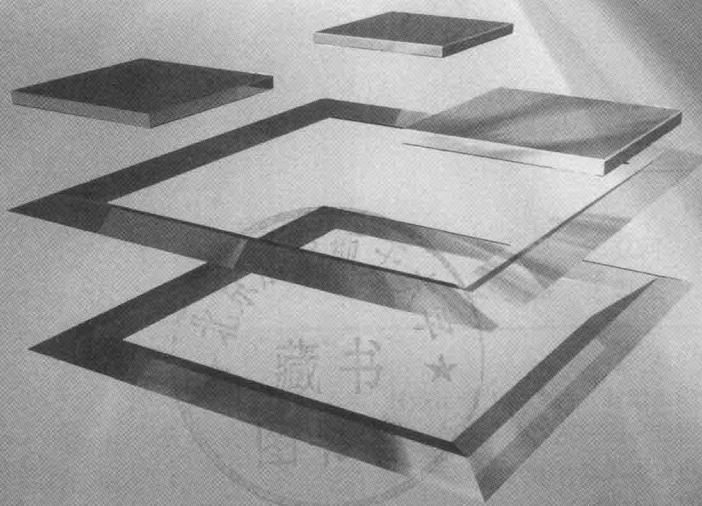
黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS

014058471

04-33
652

大学 物理实验

主 编 ◇ 安文玉 李晓光 何立志
副主编 ◇ 安立民 伊 杰 王璞玉



北航

C1745197



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS

04-33
652

17A820A10

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 安文玉, 李晓光, 何立志主编. --
哈尔滨: 黑龙江大学出版社; 北京: 北京大学出版社,
2014.5

ISBN 978-7-81129-742-3

I. ①大… II. ①安… ②李… ③何… III. ①物理学
- 实验 - 高等学校 - 教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 108837 号

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

安文玉 李晓光 何立志 主编

安立民 伊 杰 王璞玉 副主编

责任编辑 张永生 高 媛

出版发行 北京大学出版社 黑龙江大学出版社

地 址 北京市海淀区成府路 205 号 哈尔滨市南岗区学府路 74 号

印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司

开 本 787 × 1092 1/16

印 张 16.75

字 数 336 千

版 次 2014 年 5 月第 1 版

印 次 2014 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-81129-742-3

定 价 32.00 元

本书如有印装错误请与本社联系更换。

版权所有 侵权必究

前 言

本书是根据“理工科类大学物理实验课程教学基本要求”,结合我校实验仪器设备情况,在使用多年的《大学物理实验讲义》的基础上,总结教学经验,经过反复修改编写而成的。

全书共分6章,第1章为绪论,主要介绍大学物理实验课的任务、学习特点及过程和实验室的规章制度;第2章主要介绍误差、实验数据处理方法及有效数字等内容;第3~6章分别为力、热学实验,电磁学实验,光学实验和近代物理及应用性实验,共设有38个实验。

实验内容以加强基础训练为主,使学生在掌握实验方法和实验技能方面受到系统的基本训练,以提高学生的科学实验素质。大学物理实验课是学生进入大学后较早接触到的实验课,实验中有一些理论知识学生还没有学到,因此,本书对实验原理、测量方法、仪器使用等方面进行较详细的叙述,以便更好地帮助学生理解和掌握。在一些实验中安排了选做内容和学生自行设计的实验内容,以适应不同专业及不同层次的学生对物理实验课程的不同需求,利于学生个性化发展,也利于教师因材施教。

本书凝聚了黑龙江大学物理基础实验中心的全体任课教师和实验技术人员多年的教学工作成果,他们为本书的编写提供了有力的支持。本书编写过程中参考了很多兄弟院校的相关教材和有关著作,在此表示衷心感谢。

参加本书编写工作的有:安文玉(第1章,第2章的部分内容,实验3.9、3.10、3.12、3.14、4.5、4.11、5.1~5.9),李晓光(实验2.4.5~2.4.6、实验3.1~3.4、3.6、4.6、4.8~4.10、6.1~6.5),何立志(实验3.7、4.1~4.4、4.7),安立民(实验3.5、3.11、3.13、6.6),伊杰(实验3.8),王璞玉(实验6.7)。全书由安文玉总策划和负责统稿。

由于作者水平有限,书中疏漏及不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2014年3月

目 录

1 绪 论	1
1.1 大学物理实验课的任务	1
1.2 大学物理实验课的学习特点及过程	1
1.3 实验室规章制度	3
2 测量误差与实验数据处理方法	4
2.1 误差及误差的分类	4
2.2 不确定度与测量结果的表示	8
2.3 有效数字	13
2.4 实验数据处理方法	17
3 力、热学实验	28
3.1 力学实验基础知识	28
3.2 测量物体的密度	33
3.3 单摆测量重力加速度实验	38
3.4 三线摆法测定转动惯量	42
3.5 恒力矩转动法测定刚体转动惯量	48
3.6 弯曲法测量杨氏模量	53
3.7 声速测量	61
3.8 弦线上的驻波实验	69
3.9 液体表面张力系数的测定	73
3.10 落球法测量液体的黏度系数	76
3.11 空气密度与通用气体常数测量	81
3.12 测量空气的比热容比	86
3.13 测量金属的线胀系数	89
3.14 测量固体材料的导热系数	92
4 电磁学实验	96
4.1 电磁学实验基础知识	96
4.2 数字存储示波器的使用	102
4.3 惠斯通电桥测电阻	115

4.4	用电位差计测量电动势	119
4.5	静电场描绘	123
4.6	RLC 电路谐振特性研究	130
4.7	电路元件伏安特性的测定	134
4.8	霍尔效应实验	140
4.9	霍尔效应法测量螺线管磁感应强度分布	146
4.10	半导体 PN 结的物理特性及弱电流的测量	151
4.11	太阳能电池特性测量	157
5	光学实验	164
5.1	光学实验基础知识	164
5.2	分光仪的调节和使用	165
5.3	光的等厚干涉	173
5.4	迈克尔逊干涉仪	179
5.5	衍射光栅	186
5.6	偏振光旋光实验	190
5.7	单缝夫琅禾费衍射的光强分布	194
5.8	单色仪的定标	198
5.9	测量透明介质的折射率	201
6	近代物理及应用性实验	206
6.1	密立根油滴实验——电子电荷的测量	206
6.2	金属电子逸出功的测定	214
6.3	光电效应和普朗克常量的测定	221
6.4	数字电表原理及万用表设计(上)——设计制作交直流电压、电流表	226
6.5	数字电表原理及万用表设计(下)——设计制作电阻表及测量电子元件参数	243
6.6	集成电路温度传感器的特性、测量及应用	252
6.7	液体电导率测量	256

1 绪 论

1.1 大学物理实验课的任务

大学物理实验是高等学校对学生在科学实验方面进行基本训练的一门必修基础课,在这门课程中学生可以学到基本的物理实验知识、实验方法,加深对物理理论方面的理解,使学生的实验技能得到系统、严格的训练。在大学物理实验课程中始终坚持培养学生科学、严谨的思维方法,提高学生理论联系实际、综合运用知识的能力,激发学生的创新意识,培养良好的实验习惯。

大学物理实验课的具体任务如下:

(1) 学习基本的物理实验知识、实验方法、实验技能,使学生具备一定的科学实验素质。如:准确理解实验原理,正确使用基本实验仪器,掌握基本物理量的测量方法,学会记录和处理实验数据,分析总结实验结果,撰写合格的实验报告,能够完成简单的具有设计性内容的实验。

(2) 学习运用理论知识对实验现象进行分析、判断;同时要学习用实验的方法研究、验证物理规律,进一步加深对理论知识的理解。在实验过程中,进一步提高发现问题、分析问题、解决问题的能力。

(3) 培养学生实事求是的科学态度,严谨、认真的工作作风,主动研究的探索精神,遵守纪律、团结协作、爱护公物的良好习惯。

1.2 大学物理实验课的学习特点及过程

实验课与理论课不同,实验课的特点是学生在教师的指导下独立完成实验任务。一般情况下,实验的学习过程都要经过下面的几个阶段:

1.2.1 实验预习

实验课中学生是主体,要求学生自觉、主动地独立完成实验。因此,上实验课之前必须做好充分的预习。预习的内容包括:(1)认真阅读实验教材及相关的资料,了解实验目的、实验所用的仪器设备,弄清实验原理和测量方法及实验过程中应满足的实验条件等;了解实验装置及主要仪器设备的结构、使用方法、调节要求及注意事项;根据实验中的测量内容拟定数据记录表格。(2)书写预习报告。

1.2.2 实验操作及数据记录

(1)学生进入实验室必须详细了解并严格遵守实验室的各项规章制度,以保证实验者和仪器设备的安全,使整个实验得以顺利进行。

(2)实验过程中要安全、规范地操作仪器,认真、细致地观察实验现象,同时要积极思考、分析实验现象,在实验过程中要善于发现问题,并认真分析和探索。在整个实验过程中要有意识地锻炼、提高自己的实验能力。

(3)记录实验数据。实验数据是实验中最重要的一部分,要清晰、详尽地记录到表格中,更重要的是数据记录要真实,不可伪造、篡改实验数据。记录实验数据要用钢笔或圆珠笔,不可用铅笔记录,也不可先记录到草纸上然后再誊到报告纸上。如果认为数据记录错误,也不要涂改,而应标记一下,在空余处写上正确的数据,或另做一个表格,以便数据处理时进行参考,找到错误的原因。

1.2.3 实验数据的处理

测量结束要对实验数据进行处理,如计算测量结果及不确定度、作曲线、分析误差,然后总结实验结果。

1.2.4 书写实验报告

实验报告是对整个实验的全面阐述和总结。实验报告的内容应包括下列内容:

- (1)实验题目。
- (2)实验目的。
- (3)实验仪器及用具。
- (4)实验原理。

在理解的基础上,用自己的语言简明扼要地叙述实验内容,包括实验原理、实验装置示意图、电路图、光路图及实验所依据的主要公式,说明公式中各个量的物理含义、单位,公式成立所应满足的实验条件等。

以上(1)~(4)项,要求在课前预习时完成,即预习报告。下面的内容在实验室中完成。

(5)实验记录。①记录实验过程中关键步骤、实验现象、仪器操作注意事项等内容。②记录实验数据。实验数据要记录到表格中,在标题栏内注明测量内容及单位,还要注明所用仪器的型号、规格等内容(参照2.4.1)。

(6)处理实验数据。对实验数据进行整理、计算,绘制曲线,分析误差,得到实验结论。

(7)总结与讨论。讨论实验中遇到的问题,对实验的收获、体会或改进建议等,也可以解答思考题。

1.3 实验室规章制度

为保证实验安全、顺利地进行,培养良好的实验习惯,希望学生在实验过程中严格遵守下列实验室规则:

(1)学生在每次实验课前对要做的实验进行充分的预习、写好预习报告。进入实验室后教师首先要检查预习情况,预习合格者,方可进行实验。

(2)使用电源时,必须经教师或实验室工作人员检查线路,许可后方可接通电源,以免发生意外,拆电路或改电路时,首先关闭电源,然后进行操作。

(3)进入实验室应细心观察仪器的结构,了解操作规程、注意事项等,操作仪器时动作应谨慎、细致,严格按照仪器的操作规程进行。

(4)实验结束,实验数据要经教师检查,合格后可以整理仪器。

(5)实验过程中要保持实验室安静、整洁。实验结束,应将仪器复原,并将桌面和凳子收拾整齐。

(6)如有仪器损坏,应及时报告教师或实验室工作人员,并填写仪器损坏报告,说明损坏原因,依据学校有关规定进行赔偿。

2 测量误差与实验数据处理方法

2.1 误差及误差的分类

2.1.1 测量与误差

测量可分为直接测量和间接测量。直接测量是指直接测出被测量的量值,不需要与其他的量进行函数运算。如用米尺测长度,用秒表测时间,用电压表测电压等。间接测量是指通过测量一系列直接测量的量,利用直接测量的量与被测量的量之间的函数关系,从而得到被测量的量值。如物体密度的测量,需要测量物体的质量、体积,然后利用公式,计算出物体的密度。在物理实验中,很多测量都是间接测量。

实践证明,任何科学实验和测量过程中都会产生误差。因此,在测量过程中必须分析可能产生的各种误差,尽可能消除其影响,在测量结果中对不能消除的误差做出评价。

测量误差是测量结果 x 与被测量的真值(或约定真值) x_T 之差。测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差可用绝对误差和相对误差表示。

绝对误差:
$$\delta_x = x - x_T$$

相对误差:
$$E_x = \frac{\delta_x}{x_T} \times 100\%$$

用相对误差可以表示绝对误差占整个测量值的比例,一般用百分比表示。绝对误差和相对误差通常取 1~2 位有效数字。

被测量的真值是一个理想的概念,真值是无法得到的,在实际测量中可以用被测量的实际值或已修正过的平均值来代替真值。

测量误差按其产生的原因和性质可分为系统误差及随机误差。

2.1.2 系统误差

在相同的实验条件下,对被测量重复多次测量,其误差的绝对值和符号都保持恒定

或以可预知的方式变化,这样的误差称为系统误差。

系统误差的来源大致有以下几个方面:

(1)实验装置、实验方法不能完全满足理论上的要求,测量方法不完善等。例如,用单摆测量重力加速度实验中,周期公式 $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ 成立的条件之一是摆角趋于零,实际测量中如果无法满足这个条件,就会带来系统误差。

(2)测量仪器不够完善、仪器的准确度不够等。例如,刻度尺不准确,天平不等臂,砝码未校准等。

(3)环境因素的影响。例如,环境温度没有达到预定的要求。

系统误差是影响测量结果准确程度的主要因素,应在整个实验过程中认真分析导致系统误差产生的各种因素(实验原理、测量方法、测量仪器、环境影响),采取各种措施尽可能将其降低到最小。例如,在单摆测量重力加速度实验中,通过测量摆角与周期之间的关系可以得到摆角趋于零时的摆动周期,以消除摆角对测量的影响。又如,在使用物理天平时为了消除天平不等臂带来的系统误差可采用复称法测量。再如,在落球法测量液体黏度系数的实验中,由于液体是放在有限的量筒内的,不能满足小球应落入无限深广液体中的条件,所以在计算公式中要加入修正项来满足实验条件。

2.1.3 随机误差

在相同的实验条件下,对被测量重复多次测量,其误差的绝对值和符号以不可预知的方式变化,这样的误差称为随机误差。这种误差是由实验中多种偶然因素的微小变动引起的。例如,环境温度的随机变化,电源电压的起伏,实验装置不稳定,测量仪器指示数值上的波动,以及实验者在观察和估计读数中的变动等。各种因素的共同影响使测量值围绕测量值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。从个别的测量值来看,测量值具有随机性,似乎没有规律,但是如果测量次数足够多,就会发现随机误差遵循一定的统计规律。在物理实验中,对某个物理量重复多次测量,其随机误差一般近似服从正态分布。

评价测量结果的三个术语:正确度、精密度、准确度。

正确度是指测量值与真值接近的程度。正确度越高,测量值越接近真值,系统误差越小。正确度是用来反映测量结果系统误差大小的。

精密度是指重复测量值分散与集中的程度。精密度高,数据集中,随机误差小,精密度反映了测量结果随机误差的大小。

准确度综合评价测量结果的重复性与接近真值的程度。准确度高,说明正确度与精密度都高,准确度综合反映了测量结果的系统误差与随机误差。

下面讨论服从正态分布规律的随机误差的特点及处理方法。

2.1.4 随机误差的正态分布规律

2.1.4.1 正态分布函数及其特点

服从正态分布的测量值的随机误差 δ 的概率密度分布函数 $f(\delta)$ 为:

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\delta^2/2\sigma^2} \quad (2.1-1)$$

其含义为测量值的随机误差出现在 $\delta \sim (\delta + d\delta)$ 范围内的可能性(概率)为 $f(\delta) d\delta$, 如图 2.1-1(a) 中的阴影部分的面积元。式中 σ 为标准误差, 其值为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (2.1-2)$$

式中 n 为测量次数, 各次测量误差为 $\delta_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 。

正态分布的概率密度曲线是单峰对称曲线, 服从正态分布的随机误差有下列特点:

(1) 单峰、有界性。绝对值小的误差出现的可能性大, 绝对值大的误差出现的可能性小; 误差的绝对值非常大的可能性几乎是零。

(2) 对称、抵偿性。大小相等的正、负误差出现的可能性相等, 测量值在真值两侧对称分布, 当测量次数非常多时, 正、负误差相互抵消, 误差的代数和趋于零。

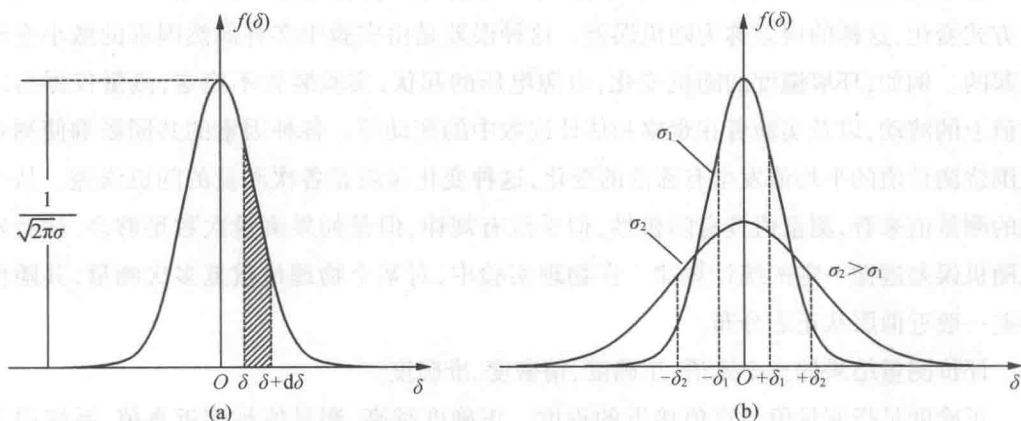


图 2.1-1 随机误差的正态分布曲线

2.1.4.2 标准误差的物理意义

由分布函数可知, 标准误差 σ 反映测量值的离散程度, 如图 2.1-1(b) 所示。 σ 值越小, 分布曲线越陡, 峰值越高, 数据越集中; σ 值越大, 分布曲线越平坦, 数据越分散。

测量值的随机误差出现在一倍标准误差 $(-\sigma, \sigma)$ 范围内的可能性(概率)为:

$$P(-\sigma < \delta < \sigma) = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\delta) d\delta = \int_{-\sigma}^{\sigma} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)^2\right] d\delta = 68.3\%$$

此式说明对任意一次测量,其随机误差落在 $(-\sigma, \sigma)$ 范围内的可能性为68.3%。

测量值的随机误差出现在三倍标准误差 $(-3\sigma, 3\sigma)$ 范围内的可能性(概率)为:

$$P(-3\sigma < \delta < 3\sigma) = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\delta) d\delta = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)^2\right] d\delta = 99.7\%$$

此式说明对任意一次测量,其随机误差落在 $(-3\sigma, 3\sigma)$ 范围内的可能性为99.7%,也就是说,在有限次的测量中,测量值的随机误差超出 $(-3\sigma, 3\sigma)$ 范围内的可能性很小,几乎不可能出现,因此把 3σ 称为极限误差。在测量次数相当多的情况下,对随机误差大于 3σ 的测量数据,可以认为是异常因素造成的坏数据,予以剔除。如果测量次数较少,这种判断不一定可靠,需用其他的方法进行判断。

2.1.5 随机误差的处理

2.1.5.1 多次测量的算术平均值作为真值的最佳估计值

在相同的测量条件下对某一物理量进行 n 次独立测量,测量列为: $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。当无系统误差时,多次测量的平均值可作为真值的最佳估计值(最接近真值的值)。证明如下:

根据最小二乘法原理,一系列等精度测量的最佳估计值是能使各次测量值与该值之差的平方和为最小的那个值。设测量值的最佳估计值为 x_0 ,则差值的平方和为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2$$

若要使差值的平方和最小,则 $f(x)$ 对 x_0 的导数为零,即

$$\frac{df(x)}{dx_0} = -2 \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) = 0$$

$$x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

这说明系统误差消除以后,测量值的平均值可以作为被测量的真值的最佳估计值,测量的次数越多平均值越接近真值。

2.1.5.2 标准误差的估算——标准偏差

(1)任意一次测量值的标准偏差

任意一次测量值 x_i 的测量误差 $\delta_i = x_i - x_T$ (x_T 为测量值的真值),由于真值无法得到,因此,不能根据式(2.1-2)计算标准误差 σ 。可以将测量值的平均值作为被测量的真值的最佳估计值,即可用平均值代替真值,

$$u_i = x_i - \bar{x}$$

称 u_i 为测量值的残差, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 可用残差估算标准误差。

根据误差理论, 当测量次数 n 为有限时, 用残差估算标准误差, 可以得到

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.1-3)$$

S_x 称为任意一次测量值的标准偏差 (也称为单次测量的标准偏差), 这个公式又称为贝塞尔公式。 S_x 是有限次测量时, 对标准误差 σ 的估计值。其代表的物理意义为: 如果对某一物理量进行多次测量, 其测量值的随机误差服从正态分布, 那么, 任意一次测量的随机误差落在 $-S_x$ 到 S_x 范围内的可能性 (概率) 为 68.3%, 这个概率又称为置信概率, 或者表示这组测量值的误差有 68.3% 的概率出现在 $-S_x$ 到 S_x 范围内。

(2) 算术平均值的标准偏差

算术平均值的标准偏差用来表征 $\bar{x}$ 对真值的离散程度。用误差理论可以证明算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 为

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2.1-4)$$

算术平均值的标准偏差是任意一次测量值标准偏差的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 。算术平均值的标准偏差

$S_{\bar{x}}$ 的物理意义: 如果多次测量的随机误差服从正态分布, 其真值落在 $(\bar{x} - S_{\bar{x}}, \bar{x} + S_{\bar{x}})$ 区间内的可能性 (置信概率) 为 68.3%。当 $n \rightarrow \infty$ 时, $S_{\bar{x}} \rightarrow 0$, 算术平均值就是真值。

2.2 不确定度与测量结果的表示

2.2.1 测量结果的表示

完整的测量结果应给出被测量的量值 x_0 (测量值的最佳估计值), 同时还要给出测量的总不确定度 Δ , 写成下列形式:

$$x = x_0 \pm \Delta \text{ (单位)}, E = \frac{\Delta}{x_0} \times 100\% \quad (2.2-1)$$

总不确定度 Δ 也称为绝对不确定度, E 为相对不确定度。绝对不确定度和相对不确定度通常取 1~2 位有效数字。

2.2.2 总不确定度

不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量的量值的不能确定的程度,是表征被测量的真值所处的量值范围的评定。普通物理实验的测量结果表示中,总不确定度 Δ 从估计方法上可分为 A 类和 B 类分量。

2.2.2.1 总不确定度的 A 类分量

总不确定度的 A 类分量是指多次重复测量用统计的方法计算出的分量 Δ_A 。它的表征值用算术平均值的标准偏差来表示。

在实际测量中,一般只能进行有限次的测量,这时随机误差不完全服从正态分布规律,而是服从 t 分布(学生分布)。当随机误差服从 t 分布时,在 $(\bar{x} - S_x, \bar{x} + S_x)$ 区间内的置信概率不是 68.3%, 在这种情况下,在 $(\bar{x} \pm t_\xi S_x)$ 或 $(\bar{x} \pm t_\xi \frac{S_x}{\sqrt{n}})$ 区间内的置信概率为 ξ , 其中因子 t_ξ 是与测量次数 n 和置信概率 ξ 有关的量, t_ξ 可以从专门的数据表中查到。所以进行有限次测量时,总不确定度的 A 类分量 $\Delta_A = t_\xi S_x$ 。

当置信概率为 95% 时, $t_{0.95}$ 和 $\frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}}$ 的值见表 2.2-1。在普通物理实验中测量次数一般不大于 10, 取置信概率 $\xi = 95\%$, 从表 2.2-1 中可以看出, 当测量次数 $5 < n \leq 10$ 时, $\frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}} \approx 1, t_\xi S_x \approx S_x$, 即

$$\Delta_A \approx S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.2-2)$$

当重复测量的次数 $5 < n \leq 10$ 时, 取 $\Delta_A = S_x$, 可使被测量的真值落在 $(\bar{x} - S_x, \bar{x} + S_x)$ 范围内的概率接近或大于 95%。所以我们可以把 S_x 的值直接当作总不确定度的 A 类分量 Δ_A 。

表 2.2-1 $t_{0.95}$ 和 $\frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}}$ 的值

n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	≥ 100
$t_{0.95}$	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.14	2.09	≤ 1.97
$\frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}}$	2.48	1.59	1.204	1.05	0.926	0.834	0.770	0.715	0.553	0.467	≤ 0.139

2.2.2.2 总不确定度的 B 类分量

总不确定度的 B 类分量是指用其他方法(非统计的方法)估计出的分量 Δ_B 。在普通

物理实验中大多数情况下可以把仪器的误差 $\Delta_{\text{仪器}}$ 简化地直接当作 B 类分量, 即 $\Delta_B \approx \Delta_{\text{仪器}}$ 。仪器的误差 $\Delta_{\text{仪器}}$ 是指计量器具有的示值误差, 或者是按仪表准确度等级计算得到的最大基本误差。

一些常用实验仪器的仪器误差见表 2.2-2:

表 2.2-2 常用实验仪器的仪器误差

仪器名称	量程	最小分度值	仪器误差 $\Delta_{\text{仪器}}$
米尺	—	1 mm	$\pm 0.5 \text{ mm}$
游标卡尺	125 mm	0.02 mm	$\pm 0.02 \text{ mm}$
螺旋测微器(千分尺)	0 ~ 25 mm	0.01 mm	$\pm 0.004 \text{ mm}$
指针式电流(电压)表	—	—	量程 $\times$ 等级(%)

2.2.2.3 总不确定度的合成

A 类分量 Δ_A 与 B 类分量 Δ_B 采用方和根的形式合成总不确定度 Δ 。

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (2.2-3)$$

如果随机误差服从 t 分布, 测量次数 $5 < n \leq 10$, 置信概率 $\xi = 95\%$, 并且总不确定度的 B 类分量简化为仪器误差 $\Delta_{\text{仪器}}$, 则总不确定度可简化为:

$$\Delta = \sqrt{S_x^2 + \Delta_{\text{仪器}}^2} \quad (2.2-4)$$

2.2.3 直接测量值的数据处理过程

对于直接测量, 为减少随机误差一般进行多次重复测量, 也有一些是做单次测量, 下面分别介绍这两种情况的数据处理过程。

2.2.3.1 多次重复测量

对某一物理量 x 进行多次重复测量, 测量的次数为 n , 得到测量列: $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。对这一列测量数据的处理方法如下:

(1) 计算测量列的算术平均值: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。

(2) 对算术平均值 $\bar{x}$ 就已定系统误差分量(绝对值和符号都已确定的可以估算出误差分量)进行修正, 得到测量值的最佳估计值 x_0 。如螺旋测微器的零点修正, 伏安法测电表内阻对测量影响的修正等。

(3) 计算总不确定度的 A 类分量。

如果随机误差服从 t 分布, 测量次数 $5 < n \leq 10$, 置信概率 $\xi = 95\%$, 则

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

(4) 计算总不确定度的 B 类分量: $\Delta_B \approx \Delta_{\text{仪器}}$ 。

(5) 合成总不确定度: $\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$ (保留 1~2 位有效数字)。

(6) 计算相对不确定度: $E = \frac{\Delta}{x_0} \times 100\%$ (保留 2 位有效数字)。

(7) 给出完整的测量结果: $x = x_0 \pm \Delta$ (单位), $E = \frac{\Delta}{x_0} \times 100\%$ 。

要求测量结果 x_0 的最后一位与总不确定度 Δ 的最后一位对齐。

2.2.3.2 单次测量

若实验中有时只能测一次或只需测一次, 则测量值就取该次的测量值, 如果存在已定系统误差分量, 应从测量值中消除已定系统误差分量, 得到测量值的最佳估计值。总不确定度 Δ 的估算, 一般采用简化的做法, 用仪器误差 $\Delta_{\text{仪器}}$ 作为总不确定度 Δ 的估计值。

例 用螺旋测微器测量一微小长度, 重复测量 6 次, 数据见表:

n	1	2	3	4	5	6
$l(\text{mm})$	2.567	2.565	2.569	2.570	2.571	2.568

螺旋测微器的零点误差 = +0.005 mm, 螺旋测微器的仪器误差 $\Delta_{\text{仪器}} = 0.004$ mm, 试处理此直接测量值, 得到完整的测量结果。

解 处理过程如下:

(1) 计算 l 的算术平均值: $\bar{l} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 l_i = 2.5683$ mm。

(2) 对算术平均值 $\bar{l} = 2.5683$ mm 消除螺旋测微器的零点误差, 得到测量值的最佳估计值 $l_0 = 2.5683 - 0.005 = 2.5633$ mm。

(3) 计算总不确定度的 A 类分量: $\Delta_A = S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (l_i - \bar{l})^2}{6-1}} = 0.0022$ mm。

(4) 计算总不确定度的 B 类分量: $\Delta_B = \Delta_{\text{仪器}} = 0.004$ mm。

(5) 合成总不确定度: $\Delta_l = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{0.0022^2 + 0.004^2} = 0.005$ mm。

(6) 计算相对不确定度: $E_l = \frac{\Delta_l}{l_0} \times 100\% = 0.20\%$

(7) 测量结果: $l = (2.563 \pm 0.005)$ mm (测量结果的最后一位与不确定度的最后一位对齐), $E_l = 0.20\%$ 。

2.2.4 不确定度的传递及间接测量值的数据处理

间接测量的结果是由直接测量结果根据一定的函数关系运算而得到的, 而每一个直接测量值都有不确定度, 直接测量值的不确定度必然会影响到间接测量结果, 使间接测量