

普通高等教育“十二五”规划教材
面向21世纪物理学课程与教学改革系列教材

1234546521.576232123223152

002455026

大学物理实验

李传国 余雯 主编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
面向 21 世纪物理学课程与教学改革系列教材

大学物理实验

李传国 余 雯 主编

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书根据教育部“理工科类大学物理实验课程教学基本要求”(2010年版)的精神,在保留物理学中的一些基本实验内容的基础上,增设了应用性、设计性与综合性实验以及近代物理实验内容。同时根据实际教学情况,结合大学物理教学内容,开设了定性与半定量实验。主要包括13个基础实验、10个提高实验和32个观察与思考项目,层次逐渐提高,可满足不同层次学生的需求。

本书可作为高等学校理工科本专科大学物理实验的教材,也可作为相关教学、研究和工程技术人员的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/李传国,余雯主编. —北京:科学出版社,2016.2

普通高等教育“十二五”规划教材 面向21世纪物理学课程与教学改革系列教材

ISBN 978-7-03-047129-1

I. ①大… II. ①李… ②余… 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(2016)第007585号

责任编辑:吉正霞 孙寓明/责任校对:董艳辉 王 晶

责任印制:彭 超/封面设计:蓝 正

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>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2016年2月第 一 版 印张:15 1/4

2016年2月第一次印刷 字数:347 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

物理学是一门研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的自然科学,也是一门建立在实验基础之上的科学.大学物理实验课程是高等学校对理工科学生进行科学实验基本训练的必修基础课程.

根据“理工科类大学物理实验课程教学基本要求”(2010年版)的精神,本书在保留物理学中的一些基本实验内容的基础上,增设了应用性、设计性与综合性实验及近代物理实验内容.结合大学物理课程教学内容,我校开设了定性与半定量实验.旨在使学生通过物理实验的基本训练,能够掌握实验的基本理论、基本方法和基本技能;提高学生进行科学实验的基本素质、科学思维和创新意识;培养学生认真严谨的科学态度和积极主动的探索精神.

本书共包括13个基础实验、10个提高实验和32个观察与思考实验项目,层次逐渐提高,可满足不同层次学生的需求.在第一层次基础实验中,主要选择一些原理较简单的实验项目,学生在理解实验的物理原理上不至于感到困难,可以将主要精力集中在基本实验技能训练、主要实验方法学习和对实验基础理论知识的掌握和运用上.在第二层次提高实验中,主要选择一些实验原理较复杂,对实验技能要求较高的实验项目,让学生在第一层次的基础上进一步提高,培养独立完成较复杂物理实验的能力,提高学生科学研究的素养.在第三层次观察与思考实验中,选择了一些引导学生观察现象、提出问题、进行分析探索的实验项目,旨在提高学生对大学物理实验与大学物理的学习兴趣,通过观察有趣的实验现象,使学生主动思考实验现象背后的物理原理,培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风、认真严谨的科学态度和积极主动的探索精神.

本书是在文华学院曾经使用多年的《物理实验讲义》基础上编写而成,结合学院创新型、应用型人才培养计划的需要,对部分内容做了修改.为了更好地满足大学物理实验课程的需求,提高学生对基本实验仪器的使用能力,本书第二章加入了基本仪器的原理与使用内容,供读者参考.

本书由李传国、余雯、丁浩、肖育英、倪昀、陶薇、力昌英、肖利霞集体完成,万士保、谢柏林根据多年实践教学经验,为本书的编写提供了许多宝贵的意见与建议,在此表示由衷的感谢.

本书在编写过程中,参考了一些兄弟院校的物理实验及大学物理教材,在这里表示衷心感谢.

编 者

2015年8月

目 录

绪论	1
第一章 数据处理基本知识	3
第一节 测量与误差	3
第二节 测量不确定度与结果评定	8
第三节 有效数字	16
第四节 数据处理	19
习题	27
第二章 基本仪器的使用	29
第一节 力学、热学实验中的基本测量仪器	29
第二节 电磁学实验基本知识	38
第三节 光学实验的基本知识	45
第三章 基础实验	49
实验一 转动惯量的测量	49
实验二 金属线膨胀系数的测量	55
实验三 液体表面张力系数的测定	61
实验四 伏安特性测量	65
实验五 电表的改装和校正	72
实验六 薄透镜焦距的测定	79
实验七 分光计的调整与使用	85
实验八 模拟静电场	93
实验九 用自由落体法测定重力加速度	100
实验十 电位差计测电动势	102
实验十一 示波器的原理与使用	109
实验十二 霍尔效应的研究	119
实验十三 动态法测杨氏模量	125
第四章 提高实验	130
实验十四 固体导热系数的测定	130
实验十五 声速的测量	135
实验十六 密立根油滴实验	142
实验十七 电位差计的设计与应用	147
实验十八 迈克耳孙干涉仪的调整与使用	159
实验十九 望远镜和显微镜的设计与组装	164
实验二十 光的干涉及应用	168
实验二十一 衍射光栅特性与光波波长的测量	174

实验二十二 偏振光的研究	180
实验二十三 全息照相	187
第五章 观察与思考	192
实验一 锥体上滚	192
实验二 离心节速器	193
实验三 翻身陀螺	193
实验四 回转仪	194
实验五 儒可夫斯基凳	195
实验六 感应起电机	196
实验七 静电摆球	197
实验八 富兰克林轮	197
实验九 避雷针原理	199
实验十 静电滚筒	200
实验十一 静电植绒	200
实验十二 静电除尘	201
实验十三 手触蓄电池	201
实验十四 温差电效应	202
实验十五 洛伦兹力	203
实验十六 电磁悬浮	203
实验十七 电磁阻尼	204
实验十八 电磁驱动	204
实验十九 巴克豪森效应	204
实验二十 热磁轮	205
实验二十一 音叉与拍现象	206
实验二十二 弦驻波	206
实验二十三 垂直振动合成	207
实验二十四 共振摆	208
实验二十五 鱼洗	208
实验二十六 两个点源波的干涉现象	208
实验二十七 双缝干涉实验	209
实验二十八 双棱镜、双面镜、洛埃镜干涉实验	210
实验二十九 光的衍射现象	211
实验三十 双折射现象	212
实验三十一 人工双折射现象	213
实验三十二 偏振光的干涉	213
附录 A 基本物理常量	215
附录 B 中华人民共和国法定计量单位	216
附录 C 一些常用的物理数据	219

目 录

附录 D 常用电子元器件参考资料	220
第一节 部分电气图形符号	220
第二节 常用电子元器件型号命名法及主要技术参数	222
附录 E 利用常用工具辅助处理实验数据	227

绪 论

物理实验是物理学的基础,物理规律的发现和物理理论的建立,都是以严格的物理实验为基础的,并受到实验的检验.

大学物理实验课是理工科大学生进行科学实验训练的一门独立设置的必修基本课程,是学生在高等学校受到系统实验方法和技能训练的开端.大学物理实验内容深、范围广,涵盖了力、热、电、光及近代科学的许多知识.学好它是为学生今后的学习、工作奠定一个良好的实验基础.因此,学好物理实验是十分重要的.

一、物理实验课的教学目的

1. 加深对物理学科的理解和认识

在实验中,通过对实验仪器的具体操作,对实验现象的观察和思考,对物理量的认真测量,经过严密的计算、分析和研究,最后得出客观的结论.实验的这一过程,会加深学生对物理知识的理解和认识,提高理论知识应用水平.

2. 培养和提高实验能力

(1) 物理实验有基础实验、综合实验和设计性实验.学生将通过不同层次的训练,从预习准备、组合仪器、动手操作、重复测量直到得出客观结果,动手能力及综合实验能力会大大提高.

(2) 认识和掌握许多仪器的使用,学会许多物理量的测量方法.实验室的仪器很多,如示波器、电压表、分光计、读数显微镜等,实验室为学生亲自动手提供了很多机会.在实验中,同学们能学到许多物理测量的方法与技巧,如比较法、放大法、转换法、模拟法、补偿法和干涉法等.

3. 培养科学实验的能力及从事科学实验的素质

物理实验就是要培养学生的动手能力、观察分析和解决问题的能力;培养学生探求真理、发明创新的团队精神;培养学生实事求是、刻苦思考、严谨认真的科研作风,爱护公共财物的优良品德;以及在实验过程中同学间相互协作、共同探索的合作精神.

二、物理实验课的主要教学环节

实验课与理论课不同,它的特点是学生在教师的指导下自己动手,独立完成实验任务.通常,每个实验项目都包括课前预习、课堂操作和课后处理三个环节.

1. 课前预习

实验前必须认真阅读教材,弄清实验原理、实验方法以及实验操作的步骤、仪器的调

节要求,才能按时完成实验.同时,预习也是培养阅读能力的学习环节.在对教材内容有了了解之后,在实验报告纸上写出“预习报告”作为正式报告的前面部分,要求在正式做实验之前写好.内容包括实验名称、实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容、实验记录.

(1) 实验名称:字迹端正、大方、工整.

(2) 实验目的:说明本实验的目的和要求.

(3) 实验原理:在理解的基础上,用自己理解的语言对实验原理进行简明扼要的叙述,其中应包括用到的物理理论依据,有关测量的计算公式,说明式中各物理量的意义和单位以及公式的适用条件(或实验的必要条件).画出实验技术中的原理图、电路图、光路图等.

(4) 实验仪器:写明具体做实验时所用的仪器的名称、规格和型号.

(5) 实验内容:简明写出实验过程中所操作的实验步骤.

(6) 实验记录:画好记录实验数据的表格.

2. 课堂操作

课堂操作是培养动手能力,手与脑并用的训练过程.在动手操作之前,要熟悉将要使用的仪器、设备、量具等的性能以及正确的操作过程、需注意事项.

在实验中,要注意对现象仔细观察分析,对观察到的现象和测得的数据随时进行判断,判断正在进行的实验过程是否正常合理.测量时做到正确读数,要实事求是地记录客观现象和数据.能做到及时判断并处理反常现象和排除实验过程中出现的故障是难能可贵的.

做完实验,将实验数据交给教师检查,得到签字认可后,再将仪器归整复原好,切断电源后,方能离开实验室.

3. 课后完成实验报告

做完实验后,要对实验上所测得的实验数据进行处理并对观察到的实验现象进行分析,这是实验的一个重要组成部分,课后处理包括以下几点.

(1) 数据处理:将实验课上测得的数据和观察到的现象工整地整理到实验报告纸上,位置可接在预习报告之后,对数据进行计算、处理,或按公式求出结果,或按函数关系在专用坐标纸上作图,按误差理论求出结果的可靠程度——不确定度.

(2) 结果表达:给出实验结果的正确表达式.

(3) 结果分析:对实验中观察到的现象,特别是反常现象进行分析,找出其原因.

(4) 问题讨论:根据实验要求,回答思考题或完成练习题.

以上三个环节的文字内容写在实验报告纸上,构成一份完整的实验报告,实验报告要求格式规整,字迹清楚,文理通顺,数据记录整洁,图表正确,并按时交报告.

第一章 数据处理基本知识

第一节 测量与误差

一、测量

1. 测量

对物理量进行测量是物理实验的重要任务之一,测量就是要找出有关物理量之间的定量关系.测量是将待测的物理量与规定作为标准的同类物理量(标准量)进行比较,得出它们之间的倍数关系.作为标准的同类量称之为单位,倍数称为测量数值.因此,一个物理量的测量值等于测量数值与单位的乘积.

2. 单位

各物理量的单位采用中华人民共和国法定计量单位规定的国际单位制(SI)为基本单位,即以米、千克、秒、安培、开尔文、摩尔、坎德拉作为基本单位,其他物理量的单位都由以上七个基本单位导出,称为国际单位导出单位.

二、测量分类

在科学实验中会用到各种类型的测量,可以从不同的角度对测量进行分类:按测量方法,可以分为直接测量和间接测量;按测量条件,可以分为等精度测量和不等精度测量.

1. 直接测量和间接测量

直接测量:直接由测量仪器或量具读数的测量值,称为直接测量.例如,用游标卡尺测量长度,用天平称质量,用秒表测时间,用电流表测电流等.

间接测量:由一组直接测量结果通过一定的函数关系(计算公式)计算出实验结果的测量称为间接测量.

例如,测量某种圆柱体材料的密度时,我们可以先测出它的高 h 和直径 d ,再用天平称它的质量 M ,则由圆柱体密度公式 $\rho = \frac{M}{V} = \frac{4M}{\pi d^2 h}$ 求测量结果密度的大小.

2. 等精度测量和不等精度测量

等精度测量:在相同条件下,对同一个物理量进行多次测量.例如,在测量人员、测量工具、测量方法、测量环境等测量条件都相同的情况进行的多次测量,每次测量的可靠程度相同,称为等精度测量.

不等精度测量：在不同条件下对某一物理量进行多次测量。例如，在测量人员、测量工具、测量环境等条件部分或是全部不同的情况下进行的多次测量，各次测量结果的可靠程度自然也不相同。称为不等精度测量。

三、测量误差

1. 真值

在一定的条件下，任何一个物理量的大小是客观存在的，是物理量所具有的客观的真实量值，这个客观存在的量值称为该物理量的真值。

2. 误差

测量的目的就是测量这个真值。但事实是，实验时，由于实验仪器性能的局限性，测量方法不完善，环境条件的不稳定，实验人员技术水平的限制，实验原理的近似性等原因，使测量值与真值之间总存在着差异，这个差异称为测量误差。即

$$\text{测量误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

或

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-1-1)$$

式中， x 为测量值； x_0 为被测量的真值； Δx 为测量误差。

一个测量结果的误差，不是正值（正误差）就是负值（负误差），它取决于这个结果是大于还是小于真值。

四、误差分类

在实验中测量时所得的测量值与真值之间总是存在着差异，因此误差也就存在于一切测量之中。在测量中，我们应力求使测量误差最小，并对可能产生的误差作出估算，为此，我们必须进一步了解误差的性质及其产生的原因。误差按其性质分为系统误差和随机误差两类。

1. 系统误差

在同一条件下多次测量同一物理量时，测量结果出现固定的误差，测量值对真值的偏离（包括大小与方向）保持恒定或可预知，或在测量条件改变时，误差也按一定规律在变化，这类误差称为系统误差。

系统误差来源有下列几个方面：

(1) 实验仪器设计、制造、装配等方面引起的误差。例如，仪器不够精密，刻度不准，零点不对，砝码未校准，天平臂不等长，安装调整不妥，应该水平放置的仪器没有放水平等。

(2) 实验测量方法不完善而引起的误差。如所引用的理论与实验条件不符，例如，在空气中称质量没有考虑空气浮力的影响，测电压时没有考虑电压表内阻对电路的影响，标准电池的电动势未作温度修正，量热时没有考虑热量的散失等等。

(3) 测量人员习惯引起的误差。例如，有人习惯侧壁斜视读、眼睛辨色能力差等，使测量值偏大或偏小。

实验时，应尽可能采取措施将系统误差降低到最小程度，比如将仪器进行校正，纠正

不良实验习惯,改变实验方法,在计算时加入一些修正值消除某些因素对实验结果的影响等等。

在实验中,由于条件的限制,不可能完全消除系统误差,在评价实验结果时,应认真对系统误差进行分析。

2. 随机误差

在消除或修正系统误差或系统误差小到可以忽略之后,在相同的条件下对同一物理量进行多次测量时,每次测量的误差时大时小,对某一次测量值来说,其误差的大小和正负都没有办法预知,没有规律,纯属偶然,这类误差称为随机误差(也叫偶然误差)。

随机误差(偶然误差)来源有下列几个方面:

(1) 由于人的感觉器官(视觉、听觉、触觉等)的灵敏程度的限制。例如,用米尺测量长度时,人眼睛分辨能力的限制和不同,在读数时就会产生各不相同的误差。

(2) 在多次测量时的条件有无法控制的微小变化。例如,电磁波的干扰、温度与气压的涨落、地壳震动、光的闪动、电压电流的波动等。

(3) 测量物体本身的不均匀性。例如,圆柱体在不同处的直径各不相同,有大有小等。

实验中,随机误差不可避免,也不能消除;但根据随机误差理论可以估计其可能出现的大小,随机误差在单次测量时可大可小,可正可负,当测量次数足够多时,即 $n \rightarrow \infty$ 时随机误差服从统计分布(正态分布)规律,可以用统计学方法估算随机误差。按照教学要求,我们仅简要地介绍随机误差的正态分布。如图 1-1-1 所示。

设在相同的条件对某一物理量进行多次测量,得 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 其各次测量值的误差为

$$\Delta x_i = x_i - x_0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

式中, x_i 为各次测量值; x_0 为该物理量的真值。

当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,误差出现服从统计规律如图 1-1-1 所示。图中横坐标 Δx 为误差,纵坐标 $G(\Delta x)$ 为一个与误差出现的概率有关的概率密度分布函数。坐标原点 $\Delta x = 0$ 处是对应于真值的位置。应用概率论的数学方法得出:

$$G(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-1-2)$$

式中, σ 为一个取决于具体测量条件的常数,称为标准误差。这种分布称为正态分布。

误差概率密度分布函数 $G(\Delta x)$ 的意义是:在误差 Δx 附近,单位误差区间内误差出现的概率。图 1-1-1 中阴影部分所包含的面积元表示误差出现在 $\Delta x \sim \Delta x + d(\Delta x)$ 区间内的概率 $G(\Delta x) \cdot d(\Delta x)$ 。误差 Δx 在 $-\infty < \Delta x < \infty$ 范围内出现的总概率应当为 1,即

$$\int_{-\infty}^{\infty} G(\Delta x) \cdot d(\Delta x) = 1$$

服从正态分布的随机误差曲线可以看出有如下特性:

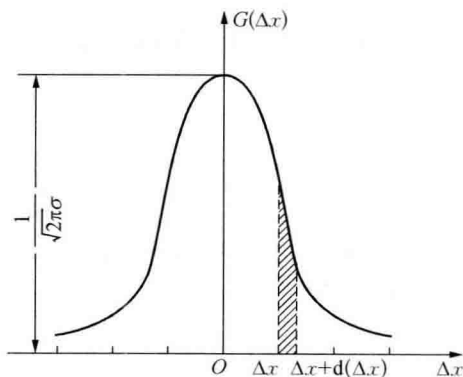
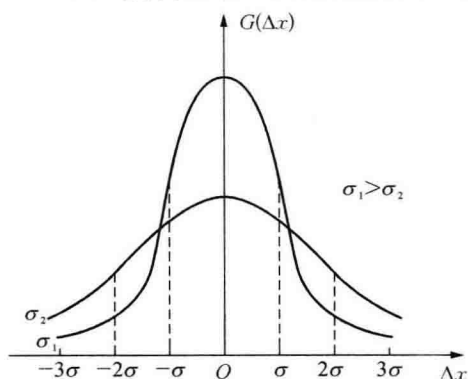


图 1-1-1 随机误差正态分布曲线

- (1) 单峰性. 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大.
- (2) 对称性. 绝对值相等的正负误差出现的概率相等.
- (3) 有界性. 在一定测量条件下, 误差的绝对值一般不超过一定限度.

图 1-1-2 不同 σ 的概率密度曲线

(4) 抵偿性. 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加愈来愈趋向于零.

随机误差的以上特性, 使之成为概率统计中的一种随机变量. 这种随机变量的概率分布函数的形式为式(1-1-2).

下面介绍标准误差的统计意义:

如图 1-1-2 所示, 标准误差 σ 的大小确定了曲线的形状. σ 值越小(峰值高), 曲线越陡, 说明测量值的误差相对于纵坐标越集中, 小误差占多数, 各测量值的离散性小, 多次重复测量所得的结果相互接近, 测量精密度高; 相反, σ 值越大, 曲线越平坦, 误差相对于纵坐标越离散, 误差分

布的范围就较大, 测量精密度低. 所以, 标准误差 σ 反映了多次测量的随机误差 Δx 的分布情况.

标准误差的数字表达式为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2} \quad (1-1-3)$$

由概率统计理论可以证明, 测量结果取 σ 的不同的倍数, 测量值误差出现在不同 σ 内可能性(概率)是

$$\begin{cases} P(-\sigma, \sigma) = \int_{-\sigma}^{\sigma} G(\Delta x) d(\Delta x) = 68.3\% \\ P(-2\sigma, 2\sigma) = \int_{-2\sigma}^{2\sigma} G(\Delta x) d(\Delta x) = 95.4\% \\ P(-3\sigma, 3\sigma) = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} G(\Delta x) d(\Delta x) = 99.7\% \end{cases} \quad (1-1-4)$$

式(1-1-4)表明, 多次重复测量误差值出现在 $-\sigma$ 到 σ 置信区间的置信概率为 68.3%, 出现在 -2σ 到 2σ 置信区间的置信概率为 95.4%, 出现在 -3σ 到 3σ 置信区间的置信概率为 99.7%. 对应于 $\pm 3\sigma$ 这个置信区间即在 1 000 次的重复测量中, 随机误差超过 $\pm 3\sigma$ 的仅有三次, 对于一般有限次测量来说, 测量值误差超过这一区间几乎不可能, 因此将 $\pm 3\sigma$ 称为极限误差.

以上只介绍了系统误差和随机误差. 在实验中, 如果方法错误, 操作不当, 或者由于粗心大意造成测量结果的差错, 即过失误差, 应避免, 估算时应加以剔除.

五、误差的估算

1. 随机误差的估算

在实验中, 由于测量过程中不可避免地存在随机误差. 每个测量值的误差以不可预知

的方式变化.就单个测量值的误差没有确定的规律,但就整体而言,却服从一定的统计规律.在不考虑系统误差的情况下,我们对随机误差进行分析与估算.

1) 多次测量的算术平均值

在同等条件下,对某一物理量进行多次等精度测量,某测量结果为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 则测量结果的算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-1-5)$$

根据随机误差(服从正态分布)的对称性,当 $n \rightarrow \infty$ 时,由于正、负误差相互抵消,各误差的代数和趋近于零,其算术平均值 $\bar{x}$ 就是真值 x .

实际上,测量次数是有限的,这时的算术平均值不是真值,但它是最近真值的测量值,称算术平均值是真值的最佳值,即近真值.

2) 算术平均偏差

在实际测量中,我们用算术平均值代替真值,而把测量值与算术平均值的差称为偏差.

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

测量值与其算术平均值之差称为该测量值的偏差.偏差是可以用测量值来直接计算的.则算术平均偏差定义

$$\Delta \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (1-1-6)$$

算术平均偏差可作为测量值偏差的一种量度,它表示在同等条件下等精度多次测量值之间的离散程度,由于取的是最大偏差,所以式(1-1-6)将各个偏差的绝对值相加.

3) 标准偏差

在实际测量,由于真值不知道,测量次数 n 总是有限的,因此误差也计算不出来.根据算术平均值是近真值的结论,我们只能用偏差即各测量值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 之差 ($\Delta x_i = x_i - \bar{x}$) 来估算误差.估算标准偏差的方法很多,我们常用贝塞尔法,它用多次测量值的算术平均值作为真值的近似值来计算多次测量的标准误差 σ . 根据概率统计理论,下面就给出用标准偏差估算随机误差的公式:

当测量次数 n 有限时,多次测量中任意一次测量值的标准偏差为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-1-7)$$

式(1-1-7)表示多次测量中测量值的“分散”程度,标准偏差 S 值小表示每次测量值很接近, S 值大表示比较分散.

4) 平均值的标准偏差

算术平均值对真值的偏差 $S_{\bar{x}}$ 是一次测量值标准偏差 S 的 $\sqrt{n}$ 分之一,即

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-1-8)$$

式(1-1-8)表示多次测量平均值偏离真值的多少. $S_{\bar{x}}$ 值小则更接近真值, $S_{\bar{x}}$ 值大则

远离真值.

2. 系统误差的估算

在物理实验中,系统误差主要指仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$,一般是由制造工厂或计量部门使用更精确的仪器、量具,通过检定比较给出的.

(1) 物理实验几种常用仪器的仪器误差见表 1-1-1.

表 1-1-1 物理实验常用的仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$

仪 器 名 称	最小分度值	仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$
钢卷尺	1 mm	1 mm
游标卡尺	0.02 mm; 0.05 mm	0.02 mm; 0.05 mm
螺旋测微器(千分尺)	0.01 mm	0.004 mm
物理天平	0.02 g; 0.05 g	0.02 g; 0.05 g
分光计	1'	1'
读数显微镜	0.01 mm	约为分度值的 $\frac{1}{2}$
各类数字仪表		仪表最小读数

(2) 电工仪表常用“基本允许的误差极限”来表示仪器误差

$$\Delta_{\text{仪}} = \pm x_m \times a\% \quad (1-1-9)$$

例如电(压)表,准确度等级 a 分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 共七级.

式(1-1-9)中 a 为准确度等级, x_m 为量程.

(3) 不知道仪器的误差或准确度等级的情况下,有式子

$$\Delta_{\text{仪}} = \frac{\text{最小分度值}}{2}$$

第二节 测量不确定度与结果评定

物理实验在测量过程中,有测量误差存在(由于存在系统误差、随机误差、过失误差等许多因素),而这些误差因素使测量结果有一定程度的不确定性,误差是测量值与真值之差,真值未知,误差不能计算,用算术平均值的标准偏差或仪器误差来表示测量结果的可信度是不够完善的.因此,国际上现在越来越多的地区已不用误差来评价测量结果,而是用另一个物理概念——不确定度(U)来对测量结果进行评价.这也是对误差进行评价.我国经审查通过作为国家标准实施的《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

不确定度是指测量中由于各种误差的存在对被测量结果不能确定的程度,即测量结果不能肯定的误差范围.在实验中每个测量结果都存在着不确定度,作为一个完整的测量结果

不仅要标明其量值的大小,还要标出测量的不确定度,以说明该测量值的可信赖程度。

误差是测量值与真值之差,它是未知的,是不能确切表达的量。

不确定度是指误差可能存在的范围,是能够用数值表达的量。这一范围的大小,是一个恒为正值。

不确定度也是对被测量的真值在某个最值范围的一种数量上的评定,它更能表示出测量量的真值落在某个置信区间($\pm\sigma$ 、 $\pm2\sigma$ 、 $\pm3\sigma$)内的置信度(置信概率) p 。

二、不确定度的分类

在物理实验中,由于误差的来源很多,测量结果的不确定度一般包括几个分量。按评定方法可分为 A 类不确定度分量和 B 类不确定度分量。

(1) 不确定度 A 类分量: 指在相同条件下,多次重复测量用统计方法进行评定的分量,记作 U_A 。

(2) 不确定度 B 类分量: 指在实验测量中用非统计方法评定的分量,记作 U_B 。

(3) 不确定度的合成: 测量结果的总不确定度通常简称不确定度,用符号 U_x 表示。下标 x 为测量物理量的符号。在 A 类、B 类不确定度分量相互独立的情况下,将按“方均根”的方法合成,即

$$U_x = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (1-2-1)$$

1. 不确定度 A 类分量

根据概率统计原理,若测量次数为无穷多次,则测量误差服从正态分布规律。A 类不确定度即为算术平均值的标准偏差,如式(1-2-2)所示。

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

在物理实验中,只能进行有限次的测量,这时的测量误差不服从正态分布规律,而是服从 t 分布规律(概率密度曲线变得较为平坦)。对于 t 分布规律要得到与正态分布规律相同的置信度(置信概率) p ,显然要扩大置信区间,即将平均值的标准偏差式(1-1-8)再乘一个大于 1 的因子 t_p ,如式(1-2-3)所示:

$$U_A = t_p u_A \quad (1-2-3)$$

t_p 因子与置信度(置信概率) p 和测量次数都有关系,见表 1-2-1。

表 1-2-1 t_p 与 n 的关系

t_p 因子 置信度 p	测量次数 n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	∞
0.683		1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.04	1.03	1
0.900		2.92	2.35	2.13	2.02	1.94	1.89	1.86	1.83	1.76	1.73	1.65
0.954		4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.37	2.31	2.26	2.15	2.09	1.96
0.997		9.93	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.25	2.98	2.86	2.58

2. 不确定度 B 类分量

在物理实验中,由测量仪器带来的误差叫系统误差,与系统误差相关的测量结果的不确定度简称为 B 类不确定度,仪器测量误差概率分布复杂,为了统一起见,我们这样约定:仪器测量误差的概率分布简单地按均匀分布考虑.它不能用统计方法进行计算,必须采用其他方法计算.为使 B 类不确定度与正态分布规律有相同的置信度(置信概率) p ,按式(1-2-4)计算 B 类不确定度.

$$U_B = K_p \cdot u_B = K_p \frac{\Delta_{\text{仪}}}{C} \quad (1-2-4)$$

式中, K_p 为置信因子; C 为置信系数.有关数据请参阅表 1-2-2、表 1-2-3.

表 1-2-2 置信概率 p 与置信因子 K_p 的关系

p	0.500	0.683	0.900	0.950	0.955	0.990	0.997
K_p	0.675	1.00	1.65	1.96	2.00	2.58	3.00

表 1-2-3 几种仪器的分布特性

仪器名称	米 尺	游标卡尺	千分尺	物理天平	秒 数
误差分布	正态分布	均匀分布	正态分布	正态分布	正态分布
C	3	$\sqrt{3}$	3	3	3

三、直接测量结果的不确定度合成

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

$$U_B = K_p u_B = K_p \frac{\Delta_{\text{仪}}}{C}$$

总不确定度的合成:

$$U_x = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = \sqrt{(t_p u_A)^2 + (K_p u_B)^2} \quad (1-2-5)$$

(2) 相对不确定度是表达物体测量质量好坏的表征量,用百分数表示:

$$U_r = \frac{U_x}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1-2-6)$$

(3) 单次测量的不确定度 A 类不确定度 $U_A = 0$, 而 B 类不确定度为 $U_B = \Delta_{\text{仪}}$.

四、测量结果的表达

测量结果 $\bar{x}$

不确定度 $U_x = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}$