

高等学校教材

大学物理实验教程

主 编 尹国盛 张忠锁 郭富强
副主编 褚新建 钟家富 唐亚楠

高等教育出版社

高等学校教材

大学物理实验教程

主 编 尹国盛 张忠锁 郭富强
副主编 褚新建 钟家富 唐亚楠

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),在作者编写的大学物理实验讲义的基础上,结合实际使用情况修订而成的。本书与作者所编的《大学物理简明教程》(第三版)配套。本书的主要特色是联系实际与突出应用。本书由44个实验组成,涉及力学实验、热学实验、电磁学实验、光学实验和近代物理实验。

本书可作为高等学校理科非物理学类专业及工科各专业的大学物理实验教材,也可供各类物理教师和相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程 / 尹国盛, 张忠锁, 郭富强主编

—北京: 高等教育出版社, 2018.2

ISBN 978-7-04-049138-8

I. ①大… II. ①尹… ②张… ③郭… 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(2017)第 313374 号

DAXUE WULI SHIYAN JIAOCHENG

策划编辑 张海雁

责任编辑 张海雁

封面设计 赵阳

版式设计 童丹

插图绘制 杜晓丹

责任校对 王雨

责任印制 赵义民

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街4号

邮政编码 100120

印 刷 大厂益利印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 17.5

字 数 330千字

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>

<http://www.hepmall.com>

<http://www.hepmall.cn>

版 次 2018年2月第1版

印 次 2018年2月第1次印刷

定 价 33.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 49138-00

大学物理 实验教程

主 编 尹国盛
张忠锁
郭富强

- 1 计算机访问 <http://abook.hep.com.cn/1255262>，或手机扫描二维码、下载并安装 Abook 应用。
- 2 注册并登录，进入“我的课程”。
- 3 输入封底数字课程账号（20 位密码，刮开涂层可见），或通过 Abook 应用扫描封底数字课程账号二维码，完成课程绑定。
- 4 单击“进入课程”按钮，开始本数字课程的学习。



课程绑定后一年为数字课程使用有效期。受硬件限制，部分内容无法在手机端显示，请按提示通过计算机访问学习。

如有使用问题，请发邮件至 abook@hep.com.cn。



扫描二维码
下载 Abook 应用

<http://abook.hep.com.cn/1255262>

前 言

本书是根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),在我们2016年所编的《大学物理实验补充讲义》和2017年修订的《大学物理实验讲义》基础上,结合实际使用情况修订而成的。本书的出版得到了“郑州工业应用技术学院重点教改项目”(JG-160110)、“河南省高等学校优秀基层教学组织建设项目”(教高[2017]730号)和“河南省教育厅教师教育教改项目”(2014-JSJYYB-008)的资助。

本书的主要特色是联系实际与突出应用。所谓“联系实际”,是指大学物理实验的理论,既紧密联系生产和工程技术的实际,也联系现在的中学教学内容以及目前学生的实际。所谓“突出应用”,是指既突出满足各专业需要的应用,也突出在人们现代生活中的应用。此外,该实验教材与理论教材都是由同一班主要人员按照一致的要求编写的。该书与尹国盛教授等主编的《大学物理简明教程》(第三版)和《大学物理基础教程》(第2版)配套,其内容包括力学实验、热学实验、电磁学实验、光学实验和近代物理实验。

本书由尹国盛教授(郑州工业应用技术学院)、张忠锁教授(郑州工业应用技术学院)、郭富强讲师(郑州工业应用技术学院)担任主编,褚新建讲师(郑州工业应用技术学院)、钟家富讲师(商丘工学院)、唐亚楠副教授(郑州师范学院)担任副主编。编写人员的具体分工为:张忠锁编写实验22、43;郭富强编写第2章和实验11、24、25、26;褚新建编写实验13、21、31;钟家富编写实验2、3、14、17、23、36、38、40;唐亚楠编写实验34、35、37、41、42、44;于涛副教授(郑州工业应用技术学院)编写第1章和实验27、28、29;路莹教授(郑州工业应用技术学院)编写实验18、19、20;侯宏涛硕士(郑州工业应用技术学院)编写实验12、15、16、24、30;邵亚云硕士(郑州工业应用技术学院)编写实验4、5、6、7、8;陈亚杰硕士(郑州工业应用技术学院)编写实验6、9、10、11、12;项会雯硕士(郑州工业应用技术学院)编写实验1、2、3、30、39;赵燕燕硕士(郑州工业应用技术学院)编写实验32、33(实验序号相同者为共同编写)。全书由尹国盛教授和张忠锁教授统稿并定稿。

衷心感谢郑州工业应用技术学院基础教学部主任刘学忠副教授,正是由于他的大力支持,本书才能得以顺利出版。感谢郑州工业应用技术学院的宋太平教授、郝东山教授、刘舜民教授、侯晨霞教授等对本书出版的支持和帮助。

由于时间仓促,编者水平有限,缺点和错误在所难免,恳请使用者批评指正。

编者

2017年4月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 物理实验课程的地位	1
1.2 物理实验课程的目的	1
1.3 科学实验能力培养的基本要求	1
1.4 做好实验的三个步骤及要求	2
1.5 实验成绩的评定	3
第 2 章 测量误差及数据处理	4
2.1 测量与测量误差	4
2.2 测量结果的不确定度	8
2.3 测量结果不确定度的估算及表示	9
2.4 有效数字	13
2.5 常用实验数据处理方法	17
练习题	22
第 3 章 基础性实验	24
实验 1 长度和密度的测量	24
实验 2 物体转动惯量的测量	32
实验 3 金属丝杨氏模量的测量	44
实验 4 冰的熔化热的测量	57
实验 5 液体汽化热的测量	62
实验 6 金属比热容的测量	67
实验 7 导热系数的测量	72
实验 8 金属线膨胀系数的测量	79
实验 9 几何光学综合实验	83
实验 10 杨氏双缝干涉实验	88
实验 11 示波器的原理与使用	92
实验 12 电桥法测电阻	98
实验 13 静电场的模拟描绘	101
实验 14 磁场测量与描绘	106
第 4 章 综合性实验	111
实验 15 弦振动时波的传播速度的测量	111
实验 16 声速的测量	118

实验 17	用拉脱法测量液体的表面张力系数	126
实验 18	迈克耳孙干涉仪的调节和使用	131
实验 19	分光计的调节和使用	136
实验 20	用牛顿环测透镜的曲率半径	142
实验 21	光电效应及普朗克常量的测量	148
实验 22	单缝衍射光强分布的测量	154
实验 23	太阳能电池特性测试实验	159
实验 24	电子束实验	162
实验 25	霍耳效应法测量磁场	172
实验 26	亥姆霍兹线圈磁场的测量	178
实验 27	金属箔式应变式传感器的特性研究	186
实验 28	压电传感器的动态响应实验	191
实验 29	光纤位移传感器的性能研究	195
第 5 章	设计性、提高性实验	198
实验 30	电表的改装与校准	198
实验 31	差动变压器的性能实验	204
实验 32	电子散斑干涉实验	208
实验 33	半导体热敏电阻特性的研究	214
实验 34	自组装望远镜	218
实验 35	用电势差计测量干电池的电动势与内阻	220
实验 36	光敏电阻特性实验	223
第 6 章	研究性实验	229
实验 37	弹簧振子的研究	229
实验 38	单摆实验的研究	233
实验 39	光偏振现象的研究	237
实验 40	pn 结正向压降温度特性的研究	242
实验 41	二极管伏安特性的研究	247
实验 42	磁阻效应实验的研究	259
实验 43	非线性电阻特性研究	263
实验 44	用衍射光栅测光波波长	265
参考文献	269

第1章 绪论

课件:绪论

1.1 物理实验课程的地位

物理学本质上是一门实验科学.无论是物理规律的发现,还是物理理论的验证,都离不开物理实验.例如,赫兹的电磁波实验使麦克斯韦电磁场理论获得普遍承认;杨氏干涉实验使光的波动学说得以确立;卢瑟福的 α 粒子散射实验揭开了原子结构的秘密;近代高能粒子对撞实验使人们深入到物质的最深层——原子核和基本粒子内部结构的研究等等.可以说,没有物理实验,就没有物理学本身.

物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础.

物理实验课是高等理工院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端.物理实验的知识、方法和技能是学生进行后继实践训练的基础,也是学生毕业后从事各项科学实践和工程实践的基础.物理实验课的教学内容覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法和手段,能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力、提高科学素养的重要基础课程.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能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用.

NOTE

1.2 物理实验课程的目的

(1) 培养学生的实验科学思想和方法以及掌握基本科学实验仪器的使用方法、提高动手操作技能.

(2) 培养学生的科学思维和创新意识,使学生掌握实验研究的基本方法,提高学生分析问题、解决问题的和实践创新的能力.

(3) 提高学生的科学素养,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、积极主动的探索精神、遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德.

1.3 科学实验能力培养的基本要求

(1) 独立学习的能力 能够自行阅读与钻研实验教材和资料,必要时自行查阅相关文献资料,掌握实验原理及方法,作好实验前的准备.

(2) 独立进行实验操作的能力 能够借助教材或仪器说明书,正确使用常用仪器及辅助设备,独立完成实验内容,逐步形成自主实验的基本能力.

(3) 分析和研究的能力 能够根据实验原理、设计思想、实验方法及相关的理

论知识对实验结果进行分析、判断、归纳和综合,掌握对物理现象和物理规律研究的基本方法,具有初步的分析和研究的能力。

(4) 书写表达能力 掌握科学与工程实践中普遍使用的数据处理与分析方法,建立误差与不确定度的概念,正确记录和处理实验数据,准确分析说明实验结果,撰写合格的实验报告,逐步培养科学技术报告和科学论文的写作能力。

(5) 理论联系实际的能力 掌握在实验中发现问题的方法,分析问题并学习解决问题的科学方法,逐步提高综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

(6) 创新与实验设计的能力 能够设计出符合规范要求的设计性、综合性实验,能设计出具有初步研究性或创意性内容的实验,逐步提高创新能力。

1.4 做好实验的三个步骤及要求

(1) 预习 操作实验之前要明确实验目的、实验内容、实验原理,熟悉仪器的工作原理、操作使用方法、操作规程,并准备好实验所需测量数据原始记录表格,写出合格的预习报告。

(2) 实验操作 在充分掌握仪器正确使用方法的前提下,利用仪器观察物理现象和测量实验数据,分析实验数据准确可靠程度、产生误差原因,实验时做到亲自动手操作和勤于动脑分析,及时发现问题并正确处理。

1) 按上课时间提前 5~10 分钟进入实验室,进实验室时要交上次实验的实验报告,将本次实验的预习报告和数据记录表格交老师检查。上课要带教材和辅导资料。

2) 进入实验室按指定位置就座,仔细检查仪器情况并记录仪器种类、型号。确定掌握了实验操作方法后,报经教师许可,开机实验。整个实验过程中不能随意调换非本组的仪器,不能随意走动,大声喧哗。每组要独立完成实验操作,并且每人都能够独立完成实验。

3) 操作要认真仔细,特别要注意仪器的正确使用和使用中的注意事项,若操作不当损坏器材,按学校规定赔偿。

4) 认真记录原始数据,仔细分析测量数据。操作结束后,将整理好的数据交教师审阅,经同意后签字,作好测试数据复现的实验准备。

5) 实验结束后,整理好仪器、搞好本组卫生、经教师检查允许后方可离开实验室。

(3) 实验报告 实验报告要写在专用物理实验报告册上,作图要用作图工具,如用坐标纸或打印结果,其内容要粘贴在实验报告上。实验报告的主要内容一般包括:

1) 实验题目。

2) 实验目的。

图片:力学实验室

图片:电学实验室

图片:光学实验室

图片:近代物理
实验室

图片:演示实验室

图片:实验报告
评分参考

- 3) 实验仪器的型号、名称.
- 4) 实验原理 实验原理要清楚简明,配合图形(示意图、电路图、光路图等)说明,复杂的装置图不画.设计性实验的设计过程写在实验原理中.
- 5) 实验内容与步骤 按实验要求写清楚、完整.
- 6) 数据处理 实验结果有定性说明的结果和定量表示的结果.定量表示的结果要按规定方式表示.
- 7) 讨论 包括问题讨论、思考题、体会、建议等.

1.5 实验成绩的评定

本课程考核方式为考查.考查成绩为 100 分,其中平时成绩占 10%,预习与实验操作占 20%,实验报告占 70%.

- (1) 平时成绩评定 包含考勤、课堂表现、设备爱护等.
- (2) 预习与实验操作评定 实验前预习,实验中能够根据实验要求和实验室提供的器材,按照实验规程、实验方案和实验步骤,独立或协作完成实验.能积极探索、发现和解决实验中遇到的问题.
- (3) 实验报告成绩评定 依据预习情况,实验报告完整性、质量进行综合评定.

第2章 测量误差及数据处理

课件:测量误差
及数据处理

2.1 测量与测量误差

1. 测量

测量指将被测量与具有计量单位的标准量在数值上进行比较,从而确定其值的过程。量值是指用数和适宜的单位表示的量,例如 1.5 m、17.5 °C、3.5 kg 等。从测量方法出发来分类,可将测量分为直接测量和间接测量。

(1) 直接测量 凡使用量仪或量具直接测得(读出)被测量数值的测量,叫直接测量。如用米尺测量长度、用温度计测量温度、用秒表测量时间以及用电表测量电流和电压等。

(2) 间接测量 待测量由若干直接测量的物理量在一定的函数关系、公式下运算获得的量,这种用间接的方法得到被测量数值的测量,称为间接测量。如测量钢球的密度时,由直接测量测出钢球的直径 d 和质量 m ,然后根据公式

$$\rho = \frac{m}{\frac{\pi}{6}d^3} \quad (0.1)$$

计算得出密度 ρ 。钢球密度的测量即为间接测量。

2. 测量的误差

测量结果都具有误差,误差自始至终存在于一切科学实验和测量的过程之中。任何测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察等都不可能做到绝对严密,这就使测量不可避免地伴随有误差产生。因此,分析测量可能产生的各种误差,尽可能地消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出估计,就是物理实验和许多科学实验中必不可少的工作。

测量误差 Δx 是测量结果 x 与被测量的真值 x_0 (或约定真值)的差值。测量误差的大小反映了测量结果的准确度,测量误差的表示方法有绝对误差 Δx 和相对误差 δx 。

$$\Delta x = x - x_0 \quad (0.2)$$

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (0.3)$$

被测量的真值是一个理想概念,一般来说真值是不知道的,在实际测量中常用被测量的实际值或修正过的算术平均值来代替真值,称为约定真值。由于真值一般为未知值,所以一般情况下是不能计算误差的,只有在少数情况下可以用准确度足够高的实际值作为量的约定真值,这时才能计算误差。

3. 误差的分类

测量中的误差主要分为两类,系统误差和随机误差。两类误差的性质不同,处

理方法也不同。

(1) 系统误差 系统误差是指在每次测量中都具有一定大小、一定符号,或按一定规律变化的测量误差分量.它来源于:① 测量方法和测量技术不完善;② 仪器构造上的不完善;③ 仪器未经过校准;④ 测量时外部条件改变;⑤ 测量者固有的习惯和测量所依据的理论的近似等等.系统误差的减少和消除是个复杂的问题,只有很好地分析了整个实验所依据的原理、方法和测量过程中的每一步以及所用的各种仪器,进而找出产生误差的各个原因,才有可能设法在测量结果中消除或减少它的影响.在某些特殊情况下人们总结有消除系统误差(固定的和变化的)的经验方法。

1) 对测量结果引入修正值.通常包括两方面的内容,一是对仪器或仪表引入修正值,通过与准确级别高的仪器或仪表作比较而获得;二是根据理论分析,导出修正公式.例如,精密称衡的空气浮力修正、量热学实验中的热量修正等。

2) 选择适当的测量方法.选择适当测量方法的目的是使系统误差能够被抵消,从而不将其代入测量结果之中.常用的方法有:

① 对换法 将测量中的某些条件(例如被测物的位置)相互交换,使产生系统误差的原因对测量的结果起相反的作用,从而抵消系统误差,如用滑线电桥测量电阻时把被测电阻与标准电阻交换位置进行测量的方法、在天平使用中的复称法等。

② 补偿法 如量热实验中采用加冰降温的办法使系统的初温低于室温以补偿升温时的散热损失,又如用电阻应变片测量磁致伸缩时的热补偿等。

③ 替代法 在一定的条件下,用某一已知量替换被测量以达到消除系统误差目的的方法.例如,用电桥精确测量电阻时,为了消除仪器误差对测量结果的影响,可以采用替代法,不过这里要求“指零”仪器应有较高的灵敏度。

④ 半周期偶数测量法 根据正弦曲线变化的周期性,系统误差(如测角仪的偏心差)可用半周期偶数测量法予以消除.这种误差在 0° 、 180° 、 360° 处为零,而在任何差半个周期的两个对应点处误差的绝对值相等而符号相反.因此,若每次都在相差半个周期处测两个值,并以平均值作为测量结果就可以消除这种系统误差.在测角仪器(如分光计、量糖计等)上广泛使用此种方法。

(2) 随机误差 随机误差是在对同一被测量在重复性条件下进行多次测量的过程中,绝对值与符号以不可预知的方式变化的测量误差的分量.这里重复性条件包括相同的测量顺序、相同的观测者、在相同的条件下使用相同的测量仪器、相同地点、在短时间内重复测量等。

随机误差是由实验中各种因素的微小变动性引起的.例如实验装置和测量机构在各次测量调整操作上的变动性、测量仪器指示数值上的变动性、观测者本人在判断和估计读数上的变动性等等.这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量的平均值发生涨落变化,这种变化量就是各次测量的随机误差。

随机误差的出现,就某一次测量值来说是没有规律的,其大小和方向都是不可预知的,但对于一个量进行足够多次的测量,就会发现随机误差是按一定的统计规律分布的.常见的一种情况是:正方向误差和负方向误差出现的次数大体相等,数值较小的误差出现的次数较多,很大的误差在没有错误的情况下通常不出现.这一规律在测量次数越多时表现得越明显,这种分布称为正态分布(又称高斯分布);在数理统计中对它有充分的研究.

正态分布的分布函数为

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

其中, $\Delta x = x_i - \bar{x}$, $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$, $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$, σ 为标准差.正态分布曲线如图 0.1 所示.由图 0.1 可以看出,正态分布曲线具有以下特点:

- 1) 单峰性 与平均值相差大,出现的概率小,正常误差概率最大;
- 2) 对称性 无论比平均值大或小,其差值的绝对值相等,出现的概率相等;
- 3) 有界性 在一定条件下,标准差的绝对值有一定的限度;
- 4) 抵偿性 标准差的算术平均值随着 $n \rightarrow \infty$ 而趋于零.

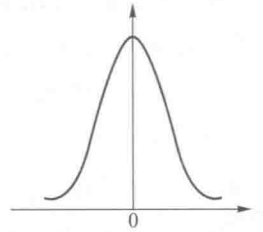


图 0.1

由正态函数积分表查得

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\Delta x) dx = 1$$

$$\int_{-\sigma}^{\sigma} f(\Delta x) dx = p(\sigma) = 0.683$$

$$\int_{-2\sigma}^{2\sigma} f(\Delta x) dx = p(2\sigma) = 0.954$$

$$\int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\Delta x) dx = p(3\sigma) = 0.997$$

误差的概率即置信度,它是以测量值为中心,在一定范围内,真值出现在该范围内的概率.上面列出的这 4 个式子表明,当 $n \rightarrow \infty$ 时,任何一次测量值与平均值之差落在 $(-\infty, \infty)$ 区间的概率为 1,满足归一化条件.而差落在 $[-\sigma, \sigma]$ 区间的概率为 0.683,即表示置信度为 68.3%,记作 $P=0.683$;差落在 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 区间的概率为 0.954,即表示置信度为 95.4%,记作 $P=0.954$;差落在 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 区间的概率为

0.997,即表示置信度为 99.7%,记作 $P=0.997$,这就是标准差 σ 的统计意义.次数无限多时,测量偏差的绝对值大于 3σ 的概率仅为 0.3%.对于有限次测量,这种可能性微乎其微,因此可以认为测量错误,测量值为坏值,应予以剔除,在分析多次测量数据时,这是很有用的 3σ 判据.

4. 测量的精度

测量的精度是测量结果与真值的接近程度,如图 0.2 所示.可以分为:

- (1) 精密度(主要反映随机误差),表示测量数据的集中或分散程度.
- (2) 准确度(主要反映系统误差),表示平均值偏离真值的程度.
- (3) 精确度(系统误差和随机误差的综合),表示整个测量数据偏离真值的程度.

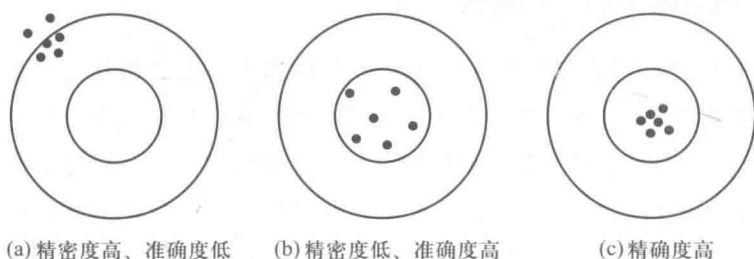


图 0.2

5. 仪器的准确度、仪器误差、仪器读数

(1) 仪器的准确度 用仪器进行测量的可靠程度,称为仪器的准确度.一般用准确度等级表示(仪器的精密度、仪器的最小分度值).

(2) 仪器误差 仪器误差是指测量值和真值之间可能产生的最大误差,又称为仪器误差极限.用符号 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示.仪器误差的计算有以下几种情况:

1) 有精度等级的仪器按国家计量局标准或仪器说明书的规定,为了计算方便,教学实验中可以用等级误差代替仪器误差,等级误差 = 量程(或读数) \times 等级%.

2) 没有标明精度等级的仪器

① 连续读数仪器 仪器误差为最小分度值的一半.

② 跳跃读数仪器 仪器误差为最小分度值.

(3) 仪器读数

1) 仪器读数首先按准确度进行读数

① 跳跃读数仪器 读到最小分度.如数字仪表读到最后一位,游标读数读到最小分度.

② 连续读数仪器 最小分度要进行估读.如米尺、千分尺、指针式电表等.常用的估读方法有:

a) 1/10 估读 将最小分度分为 10 等份估读,用于较清晰的刻度和较稳定的指针.

b) 1/5 估读 将最小分度分为 5 等份估读,用于个别的刻度标有 0.5 的仪器.

c) 1/2 估读 将最小分度分为 2 等份估读,用于刻度较窄、指针较宽、指针有摆动的仪器等.

2) 仪器读数的有效数字记录

仪器读数要整理成有效数字进行记录,即最后一位是可疑位(仪器误差位).一般的仪器以准确度读数的最后一位为仪器误差位,因此实验中大部分仪器按准确度进行读数和记录.但有一些仪器除外,如电阻箱系列的仪器,应先算出仪器误差,再根据仪器误差的数位按有效数字记录读数.

2.2 测量结果的不确定度

在测量过程中,测量误差是普遍存在的.各种误差因素必然导致测量结果偏离真值,即具有误差,且每次结果的误差又具有一定的不确定性.为了对测量结果的这种不确定程度进行定量的估计,需要引入一个新的概念——不确定度.1993年,国际计量局(BIPM)等七个国际组织正式发布了“测量不确定度表示指南”,简称“GUM”.指南中规范了各领域中测量不确定度计算和表达的方法.我国自1999年5月1日起实施GUM,开始科学、准确、规范地表示测量结果.

测量不确定度是与测量结果相联系的参数,表征合理的赋予被测量值的分散性.它反映测量值附近的一个范围,真值以一定的概率落在其中.不确定度越小,标志着误差的可能值越小,测量的可信赖程度越高;不确定度越大,标志着误差的可能值越大,测量的可信赖程度越低.所以说,测量不确定度是测量质量的一个极其重要的指标.

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类标准不确定度(u_A)

凡是可以通过统计方法来计算的不确定度称为A类不确定度.

算术平均值

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

变量的标准差

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

注意:变量的标准差过去用 σ 表示,现在计算不确定度时用 $S(x)$ 表示.

算术平均值的标准差

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

通常用算术平均值的标准差来表示 A 类不确定度,称为 A 类标准不确定度,用 u_A 表示.

$$u_A = S(\bar{x}) = \frac{S(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (0.4)$$

2. B 类标准不确定度(u_B)

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,用标准差表示的 B 类不确定度称为 B 类标准不确定度,用 u_B 表示.

B 类不确定度一般有多个分量, u_{B1}, u_{B2}, \dots ,它们一般与一定的系统误差相联系.这些分量不能用统计方法得出,因此只能根据具体情况进行估算.对 B 类不确定度的评定,有的依据仪器说明书或鉴定书,有的依据仪器的准确度等级,有的则粗略地依据仪器的分度值或经验.从这些信息可以获得该项系统误差的极限值 $\Delta_{\text{仪}}$.对此误差一般按误差理论的均匀分布处理,其标准差为 $\Delta_{\text{仪}}/\sqrt{3}$,则 B 类标准不确定度 u_B 取为

$$u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (0.5)$$

实际上该项误差的分布可能不是严格的均匀分布,这时式(0.5)中的换算系数将和 $\sqrt{3}$ 不同,但可按此作近似处理.

例如,使用一准确度等级为 0.5 级、量程为 0~100 mA 的电流表测一电路的电流 I ,则由电流表的基本误差引入的 I 的标准不确定度就是 B 类不确定度, $\Delta_{\text{仪}} = 0.5\% \times 100 \text{ mA}$,则

$$u_B(I) = (0.5\% \times 100) / \sqrt{3} \text{ mA} = 0.29 \text{ mA}$$

3. 合成标准不确定度(u_c)

若测量结果所含的 A 类标准不确定度和 B 类标准不确定度分量之间是相互独立的,则合成标准不确定度 u_c 为

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \dots} \quad (0.6)$$

2.3 测量结果不确定度的估算及表示

1. 用不确定度表示测量结果的准确程度

在得到了测量值和计算出合成不确定度后,通常要写成下列形式:

$$N = \bar{N} \pm u_c \text{ (单位)} \quad (P = 68.3\%) \quad (0.7)$$

相对不确定度为

$$E = \frac{u_c}{\bar{N}} \times 100\% \quad (0.8)$$

式(0.7)称为测量结果表达式.其中 N 为真值, \bar{N} 为测量值的平均值, P 是置信度.其物理意义是:真值在 $(\bar{N}-u_c) \sim (\bar{N}+u_c)$ 范围内的置信度是68.3%.还可以取 $2u_c$ 、 $3u_c$ 等(就是取不同概率大小的总不确定度),这时结果表达式可以写成 $N = \bar{N} \pm 2u_c$, $N = \bar{N} \pm 3u_c$ 等.它们的物理意义就成为:真值在 $(\bar{N}-2u_c) \sim (\bar{N}+2u_c)$ 或 $(\bar{N}-3u_c) \sim (\bar{N}+3u_c)$ 范围内的置信度为95.4%或99.7%.实际测量中,要得到准确概率是比较困难的,实际概率是以上理论概率的近似.在实验结果表示中,一般采用式(0.8).

2. 直接测量结果的不确定度估算

(1) 单次测量

实际测量中,遇到不能进行(或不需)多次测量的量,把测量值 x_1 作为该物理量的值,取仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 作为测量的不确定度,即

$$x = x_1 \pm \Delta_{\text{仪}} \text{ (单位)} \quad (P = 100\%) \quad (0.9)$$

或

$$x = x_1 \pm u_c = x_1 \pm \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3} \text{ (单位)} \quad (P = 68.3\%)$$

相对不确定度

$$E = \frac{u_c}{x_1} \times 100\% \quad (0.10)$$

仪器误差一般根据生产厂家仪器说明书规定的示值误差或准确等级来确定.例如,50分度的游标卡尺,测量范围为0~300 mm,示值误差为 ± 0.02 mm;量程150 mA、0.5级的电流表的允许误差限为0.75 mA(磁电式电表误差=量程 \times 级别%).

在物理实验中还可以简化约定一些仪器的误差,即取其最小刻度的1/2或1/3,如米尺 $\Delta_{\text{仪}} = 0.5$ mm、千分尺 $\Delta_{\text{仪}} = 0.005$ mm等.

(2) 多次等精度直接测量的处理

如果对一物理量进行多次测量.例如对物理量 x 进行等精度测量,得到一系列 x_1, x_2, \dots, x_n 数值,在测量没有错误及符合统计规律的情况下,可以用算术平均值 \bar{x} 表示测量的最佳值,即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (0.11)$$

当测量次数无限多时,算术平均值将无限接近真值.