

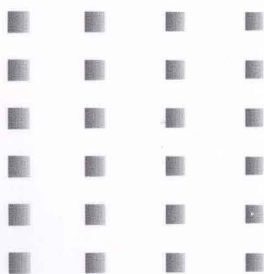
普通高等院校“十二五”规划教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

张永利 主 编

邵明辉 崔晓军 黄继阳 副主编



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

普通高等院校“十二五”规划教材

大学物理实验

张永利 主编

邵明辉 崔晓军 黄继阳 副主编



西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容简介

本书是根据《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)编写而成。全书共六章,分别为绪论、实验数据处理的基础知识、自修实验、基础实验、综合性实验和设计性实验,其中,自修实验是为学生能顺利从高中实验过渡到大学物理实验而安排的自学内容。遵照“厚基础、宽口径、大综合”的原则,全书内容的编写在力求体现时代性和先进性的同时,更注重了科学实验基本素质的培养和创新意识的培养。

本书可作为高等院校理工科类专业学生的物理实验教材或教学参考书,也可供其他爱好者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 张永利主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2012.8
普通高等院校“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5643-1858-1

I. ①大… II. ①张… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第176377号

普通高等院校“十二五”规划教材

大学物理实验

张永利 主编

*

责任编辑 牛君

特邀编辑 赵雄亮

封面设计 9:23设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都中铁二局永经堂印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 15.25

字数: 381千字

2012年8月第1版 2012年8月第1次印刷

ISBN 978-7-5643-1858-1

定价: 29.80元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

大学物理实验课是高等学校理工科类专业学生的一门重要基础课。它丰富的实验思想、方法和手段以及所能提供的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，提高其科学实验素养的重要基础。

本书是根据 2010 年版《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，并结合编者多年的教学实践编写而成的。

全书共六章，具体内容如下：

第一章“绪论”，主要介绍了大学物理实验课的任务、基本程序和要求。

第二章“实验数据处理的基础知识”，主要介绍了误差的基本概念、物理实验中数据处理的几种常用方法和在大学物理实验课中经过简化的用不确定度评定测量结果的方法。

第三章“自修实验”，安排了常用长度测量仪器的使用和常用电学测量仪器的使用两个实验项目，是为学生能顺利从高中实验过渡到大学物理实验而安排的自学内容。

第四章“基础实验”，有 14 个实验项目，内容涉及力、热、电、光等各方面，主要目的是强化基本实验知识的学习和基本实验技能的训练。

第五章“综合性实验”，有 22 个实验项目，所涉及的实验内容、实验仪器、实验技术和测量方法等具有综合性，并力求体现时代特点。目的是巩固学生在基础实验阶段的学习成果，开阔学生的眼界和思路，提高学生对实验方法和实验技术的综合运用能力。

第六章“设计性实验”，有 5 个实验项目，要求学生通过自行设计实验装置、实验步骤，独立地完成实验。目的是使学生了解科学实验的全过程，逐步掌握科学思想和方法，培养学生独立实验的能力和运用所学知识解决问题的能力。

本书由张永利组织编写并统稿，由邵明辉、崔晓军、黄继阳任副主编。参加本书编写的人员及分工编写的具体内容如下：张永利编写第一章，第二章，第三章，第四章的实验 2、3、5 和第五章的实验 13；邵明辉编写第四章的实验 1 和第五章的实验 1、12、15；崔晓军编写第五章的实验 2、4、8、14；黄继阳编写第四章的实验 13、14 和第五章的实验 7、19、20；荣振宇编写第四章的实验 10、11 和第五章的实验 21、22；陈小艺编写第四章的实验 7 和第五章的实验 9、10、16；李淑娟编写第四章的实验 4 和第五章的实验 6、11；孙平编写第四章的实验 6 和第五章的实验 17、18；童艳荣编写第四章的实验 8、12 和第五章的实验 5；宋朋编写第四章的实验 9 和第五章的实验 3；王教方编写第六章的实验 2、3 和附表；宋淑珍编写

第六章的实验 1、4、5。在本书出版之际，对前期参与本书编写工作并做出贡献的王少清、王培吉同志以及对本书编写工作提供支持和帮助的同事们表示衷心的感谢，并向为本书出版提供热情服务的西南交通大学出版社致以诚挚的谢意。

在本书的编写过程中，参阅了许多兄弟院校的相关教材，吸收了许多先进经验，有些已在参考文献中列出，有些未能一一列出，在此向他们一并致以最诚挚的谢意。

由于编者水平有限，加之编写时间仓促，书中难免存在不妥之处，恳请读者和同行专家们批评指正。

编 者

2012年4月

目 录

第 1 章 绪 论	1
第 2 章 实验数据处理的基础知识	4
2.1 测量与测量误差	4
2.2 测量结果的不确定度	7
2.3 有效数字及其运算	11
2.4 数据处理的几种常用方法	14
2.5 习 题	18
第 3 章 自修实验	20
实验 3-1 常用长度测量仪器的使用	20
实验 3-2 常用电学仪器的使用	23
第 4 章 基础实验	29
实验 4-1 拉伸法测杨氏模量	29
实验 4-2 扭摆法测转动惯量	33
实验 4-3 液体表面张力系数的测量	39
实验 4-4 空气比热容比的测定	43
实验 4-5 金属比热容的测量	48
实验 4-6 电桥的使用(单臂、双臂)	51
实验 4-7 电表的组装与校准	57
实验 4-8 模拟法描绘静电场	61
实验 4-9 二踪示波器的使用	65
实验 4-10 等厚干涉法长度计量	73
实验 4-11 分光计的调整及光栅常数测定	78
实验 4-12 光的偏振特性研究	86
实验 4-13 液体旋光物质的浓度测量	90
实验 4-14 迈克尔逊干涉仪的调节与使用	93
第 5 章 综合性实验	98
实验 5-1 动力学法测杨氏模量	98
实验 5-2 声速的测定	101
实验 5-3 受迫振动的研究	106
实验 5-4 气体相对压力系数测定	114
实验 5-5 不良导体导热系数测定	119
实验 5-6 干涉法测线膨胀系数	124

实验 5-7	螺线管轴向磁感应强度分布测定	130
实验 5-8	铁磁材料居里点的测定	138
实验 5-9	铁磁材料磁化特性研究	141
实验 5-10	各向异性磁阻传感器与磁场测量	146
实验 5-11	光敏电阻特性研究	153
实验 5-12	硅光电池特性的研究	158
实验 5-13	PN 结温度特性研究	166
实验 5-14	光纤通信的研究	169
实验 5-15	非线性电路混沌现象研究	173
实验 5-16	CSY 系列传感器系统实验	177
实验 5-17	密立根油滴实验	186
实验 5-18	夫兰克—赫兹实验	192
实验 5-19	光电效应和普朗克常数的测定	197
实验 5-20	金属电子逸出功的测定	204
实验 5-21	旋转液体综合实验	211
实验 5-22	全息照相	215
第 6 章	设计性实验	221
	概 述	221
实验 6-1	液体黏滞系数的测定	223
实验 6-2	变阻器分压与限流特性的研究	225
实验 6-3	用电位差计校准电压表、电流表	226
实验 6-4	棱镜介质色散关系的研究	228
实验 6-5	光源相干性的研究	230
附 表		233

第1章 绪论

物理学是一门实验科学。任何物理规律的建立都是以严格的实验事实为基础，并且不断受到实验的检验。作为物理学研究自然现象、探索和掌握客观规律的重要手段，物理实验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。

大学物理实验是高等学校理工类专业对学生进行科学实验基本训练的一门重要基础课。通过大学物理实验课程的学习，学生不仅可以加深对所学物理理论的理解，更重要的是可以使获得基本的实验知识，在实验方法和实验技能方面得到较为系统、严格的训练，为今后的学习和科学研究打下基础。

1. 大学物理实验课的任务

(1) 培养与提高学生的基本科学实验技能。

通过对物理实验现象的观察分析和对物理量的测量，使学生掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能，学习运用物理学原理和物理实验方法研究物理规律。

(2) 培养与提高学生从事科学实验的能力，主要包括：

自学能力——能够通过阅读实验教材、查询有关资料，掌握实验原理及方法，做好实验前的准备。

动手能力——能够借助教材和仪器说明书，正确调整和使用仪器，并能发现和排除故障。

思维判断能力——能够融合实验原理、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行分析和判断。

书面表达能力——能够正确记录和处理实验数据，绘制实验图表，分析实验结果，撰写合格的实验报告。

初步的实验设计能力——根据课题要求，能够确定实验方法和条件，合理选配仪器，拟定具体的实验步骤。

(3) 提高学生的科学素养。其包括：

培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风，认真严谨的工作态度，积极主动的探索精神和创新意识，以及遵守纪律、团结协作、爱护公物公共财产的优良品德。

2. 大学物理实验课的主要教学环节及要求

(1) 实验预习。

实验前的预习是学生上好实验课的关键。实验预习要求学生在课前做好以下工作：

- ① 认真阅读实验教材和有关资料，从中整理出实验的基本原理和方法。
- ② 熟悉所用仪器的基本性能、工作原理、工作条件以及操作规程。

- ③ 明确实验任务，掌握实验步骤和实验的注意事项。
- ④ 对设计性实验还要自拟实验方案，自己设计电路图或光路图等。
- ⑤ 在做好上述准备工作的基础上写出预习报告。

预习报告可以作为实验报告的一部分，认真地写在实验报告纸上。预习报告的主要内容有：① 实验题目；② 实验目的；③ 实验原理；④ 实验仪器；⑤ 实验内容与步骤；⑥ 注意事项；⑦ 原始数据记录表格（此表格要画在原始记录纸上）等。

（2）上实验课。

上实验课是学生到实验室完成实验任务的过程。学生进入实验室上课，必须携带实验教材、预习报告、原始数据记录纸等。上课时，老师会先检查学生的预习报告及预习情况，并简要介绍实验的原理、方法、要求以及仪器使用的注意事项等。学生要根据自己的预习情况学习，并要格外注意老师所强调的注意事项。

做实验时，学生要注意以下几个问题：

① 安装调节仪器时，要注意使仪器的布局合理。在进行测量时，必须满足仪器的正常工作条件（水平、垂直、工作电压、光照等），并按仪器的操作规程进行。

② 要科学地、实事求是地记录下实验中观察到的现象和测得的数据，同时记录与实验结果有关的实验条件（如温度、湿度等）和实际使用仪器的名称、型号等。实验数据一定要直接记录在原始数据记录纸上，注意有效数字和单位要正确。

若发现测得的数据有误，切不可在原数据上直接涂改，而要用一段横线将其划掉，在旁边补上正确的数据，使正、误数据都能清晰可辨，以备分析讨论之用。

③ 测量完成后，要对测得的数据进行分析，在肯定结果基本正确后，将实验的原始数据记录交由老师审阅签字。数据签字后方可整理仪器（将其恢复原样），打扫卫生结束实验，经老师允许后离开实验室。

（3）完成实验报告。

实验报告是学生向实验指导老师提交的报告自己工作成果的总结报告，要求简洁明了、字迹工整、图表规范。一份完整的实验报告应在完善预习报告的基础上增加以下内容：

① 实验现象和数据的观测记录（此项工作是将原始记录上所记的内容整理到实验报告纸上，而不是指原始数据记录）。

② 数据处理，包括计算实验结果、绘制实验图线（要用坐标纸或计算机绘图软件）、进行误差或不确定度分析等。在进行计算时，一定要写出计算公式，并将实验数据代入公式中。

③ 实验结果表达（或结论表述）。

④ 实验小结、讨论、回答思考题等。

⑤ 在实验报告后附上有老师签字的原始记录（未附原始记录的报告无效）。

需要提醒的是，出现下列情况之一的原始数据记录无效：

① 用铅笔记录的原始数据记录无效。

② 经过涂改或用橡皮、胶带纸、修正液更改过的原始数据记录无效。

③ 换纸重新抄写的原始记录无效。若部分数据确需整理，可写在原记录纸的反面，并经指导老师签字认可。

④ 无实验指导老师签字的原始数据记录无效。

3. 学生实验守则

- (1) 严格遵守实验室的各项规章制度，不得迟到和旷课。
- (2) 实验课前必须认真预习并写好预习报告，经指导教师检查合格后方可做实验。
- (3) 如有特殊情况，必须在课前向实验指导教师请假，课后补假无效。
- (4) 严格遵守仪器设备使用操作规程，实验仪器准备完毕后，需经指导老师允许方可通电启动。
- (5) 仪器发生不正常现象或损坏时，要及时向指导教师报告。凡属违反操作规程导致仪器设备损坏的要照章赔偿。
- (6) 实验中要严肃认真，以科学的态度真实记录实验结果和数据。
- (7) 实验结束时，记录的实验结果和数据要经指导教师检查和签字。要认真搞好实验室的清洁卫生，整理好实验现场，经指导教师同意后方可离开实验室。
- (8) 实验课后要认真写好实验报告并按时送交。

【参考文献】

- [1] 教育部. 理工科类大学物理实验课程的教学基本要求[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.

第2章 实验数据处理的基础知识

2.1 测量与测量误差

2.1.1 测量及其分类

在人类的生产、生活及科学研究等实践活动中，经常要对各种量进行测量以获得其客观的定量信息。而所谓测量，就是将被测量直接或间接地与标准量进行比较，从而确定被测量是该标准量多少倍的操作过程。

1. 直接测量和间接测量

按照测量值获得方法的不同，测量可分为直接测量和间接测量。

凡能直接从测量仪器或量具上读出测量结果的都称为直接测量，如用米尺测长度、用天平测质量等。相应的被测量则称为直接测量量。

凡是利用直接测量量，经由一定的函数关系运算后才能得到测量结果的，称为间接测量，如声速的测量、密度的测量等。显然，直接测量是间接测量的基础。

2. 等精度测量和不等精度测量

按照测量条件的不同，测量可分为等精度测量和不等精度测量。

在测量条件（测量者、仪器、测量方法及外部环境条件等）不变的情况下进行的重复测量，称为等精度测量。如果测量条件中有一个或几个发生了变化，这时对同一物理量所进行的多次测量称为不等精度测量。由于不等精度测量获得的数据的可信赖程度不同，所以在数据处理时，需要根据每个测量值的“权重”进行加权平均。

2.1.2 测量误差及其分类

一般来说，测量是测量者在一定的环境条件下，采用某种测量仪器和测量方法来进行的。由于仪器不可能尽善尽美，环境条件不会一成不变，测量者读取的数据也不可能完全准确。因此，测量的结果总会有误差存在。

1. 测量误差

我们把被测量在一定客观条件下的真实大小，称为该量的真值，而把某次对它测量得到的值称为测量值。测量误差的大小反映了测量结果的准确程度，可以用绝对误差表示，也可

以用相对误差表示, 即

$$\text{绝对误差} = \text{测量值} - \text{被测量真值} \quad (2-1-1)$$

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{被测量真值}} \times 100\% \quad (2-1-2)$$

2. 测量误差的分类

按照误差产生的原因和基本性质, 可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 系统误差。

在相同条件下对同一物理量进行多次测量时, 测量误差的大小和符号始终保持恒定, 或者按某种确定的规律变化, 这种误差就称为系统误差。它主要是由以下因素引起的:

- ① 测量所用仪器本身的缺陷, 如仪器零点未对准、天平砝码有缺损而又未校准等;
- ② 实验所依据的原理不够完善或实验条件达不到理论公式规定的要求而造成的误差等, 如用伏安法测电阻没考虑电表内阻、用单摆测重力加速度忽略了空气阻力;
- ③ 由于测量者感觉器官的灵敏度不够高, 或者个人不正确的习惯所造成的误差;
- ④ 环境条件发生变化或测量仪器规定的适用条件没有满足等所造成的误差等。

系统误差经常是一些实验测量的主要误差来源, 但依靠多次重复测量一般都不能发现系统误差的存在, 处理不当往往对测量结果带来很大影响。

对系统误差的处理通常有两种方法。对于可以确定大小和符号的系统误差(称为可定系统误差), 可以在测量过程中采取措施予以消除或在测量结果中进行修正; 对不能确切掌握其大小和符号的系统误差(称为未定系统误差), 一般只能估计其取值范围。

(2) 随机误差。

在相同条件下重复测量同一物理量, 测量误差的大小和符号以不可预知的方式变化着, 这种误差称为随机误差。在测量次数少时, 随机误差显得毫无规律可循, 但当测量次数足够多时, 随机误差的大小以及正负误差的出现都服从某种统计规律。

随机误差主要是由于测量过程中一些随机的或不确定因素的微小变化所引起的。例如, 电源电压的波动、气流的扰动或测量者个人感官功能的随机起伏等。这些因素一般无法预知, 也难以控制。所以, 在测量过程中, 随机误差的出现带有一定的必然性。

绝大多数的随机误差都服从正态分布(高斯分布), 亦即对于大多数物理测量, 随机误差具有以下性质:

- ① 单峰性。绝对值小的误差出现的概率大, 绝对值大的误差出现的概率小。
- ② 对称性。大小相等、符号相反的误差出现的概率相等。
- ③ 有界性。绝对值非常大的正、负误差出现的概率趋近于零。
- ④ 抵偿性。当测量次数趋近于无限多时, 由于正负误差互相抵消, 各误差的代数和趋近于零。

随机误差正态分布的这些性质如图 2-1-1 所示。该曲线横坐标 ε 为误差, 纵坐标 $f(\varepsilon)$ 即为误差的概率密度分布函数, 它表示的意义是, 误差出现在 ε 处单位误差范围内的概率。 $f(\varepsilon)d\varepsilon$ 则表示误差出现在 ε 至 $\varepsilon+d\varepsilon$ 区间内的概率, 也就是图 2-1-1 中阴影包含的面积元。整个误差分布曲线下的面积为单位 1。

根据统计理论可以证明, 函数 $f(\varepsilon)$ 的具体形式为

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}} \quad (2-1-3)$$

式中， σ 是一个取决于具体测量条件的常数，称为标准误差，它对正态分布曲线的影响如图 2-1-2 所示。

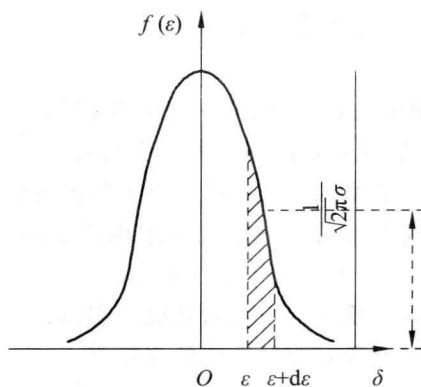


图 2-1-1 随机误差的正态分布曲线

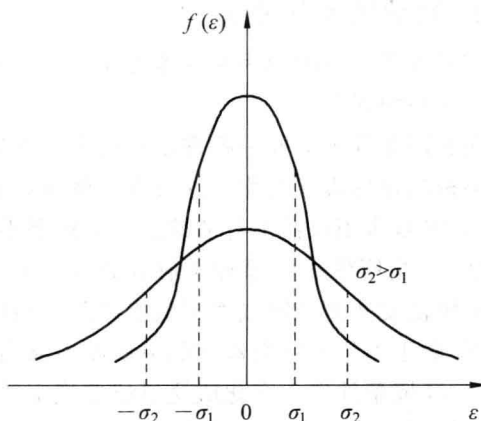


图 2-1-2 σ 对正态分布曲线的影响

综上所述，系统误差与随机误差有着不同的产生原因和不同的性质。因此，它们对测量结果的影响也各不相同。通常用“准确度”这一术语来表征测量结果的系统误差的大小，即测量结果对真值的偏离大小；用“精密度”这一术语来表征测量结果随机误差的大小，即对同一物理量在相同的条件下多次测量所得的各测量值相互接近的程度；而用“精确度”这一术语来表征对准确度和精密度综合评价。下面用射击打靶的结果进行类比来说明这三个概念。

图 2-1-3 (a) 所示的弹着点明显偏离靶心，存在着较大的系统误差，是准确度低；但其弹着点比较集中，离散程度不大，是精密度较高。图 2-1-3 (b) 所示弹着点比较分散，因此精密度不高；但是从弹着点分布情况来看，并没有明显的固定偏向，平均弹着点比较接近靶心，因此可以认为它的准确度是较高的。图 2-1-3 (c) 则不仅精密度高，而且准确度也高，可以说这一结果精确度高。

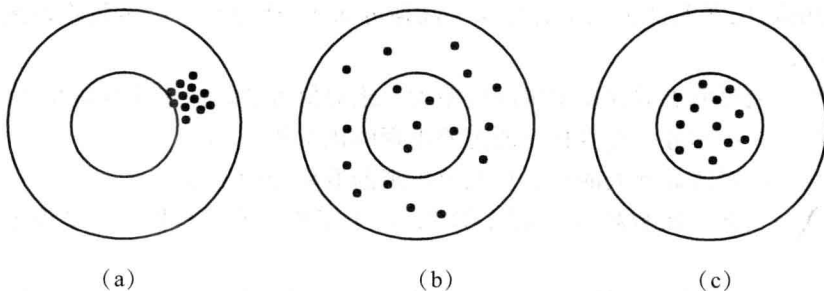


图 2-1-3 测量结果准确程度与射击打靶的类比

(3) 粗大误差。

这是一种明显超出统计规律预期值的误差，具有异常值，通常是由测量仪器的故障、测量条件的失常及测量者的失误而引起的。带有粗大误差的实验数据是不可靠的，一旦发现测

量数据中可能有粗大误差数据存在, 应进行重测。如条件不允许重新测量, 应在能够确定的情况下, 剔除含有粗大误差的数据, 但必须十分慎重。

2.2 测量结果的不确定度

对一个物理量进行测量后, 应给出测量结果, 并要对测量结果的可靠性作出评价。根据定义, 误差是评价测量结果的合适指标, 但由于误差是指测量值与真值之差, 而真值一般无法知道, 因此误差也是无法知道的。为此, 近年来引入“不确定度”这一概念来评价测量结果的可靠程度。

不确定度的理论比较复杂, 在大学物理实验课中, 我们将对其做简单化处理, 使初学者了解不确定度的基本概念, 学会最基本的估算不确定度的方法, 为以后的学习和应用打下基础。

2.2.1 不确定度的基本概念

测量结果的不确定度(也称为实验不确定度或简称为不确定度), 是对被测量的真值所处的量值范围的评定。不确定度给出了在被测量平均值附近的一个范围, 真值以一定的概率落在此范围中。在测量方法正确的情况下, 不确定度越小, 标志着测量结果与真值的误差越小。

由于测量结果通常与多个物理量有关, 所以测量结果的不确定度也可能来源于若干因素, 这些因素使测量结果的不确定度形成若干分量。按照《国际计量局实验不确定度的规定建议书》中的评定方法, 用不确定度来评价测量的结果, 是将测量结果中可修正的可定系统误差修正以后, 再将剩余的误差划分为可以用统计方法计算的 A 类不确定度和用非统计的方法估算的 B 类不确定度来表示。

1. A 类不确定度分量(简称 A 分量)

A 类不确定度分量是指用统计的方法评定的不确定度分量, 用 u_A 表示。在物理实验课中, A 类不确定度主要体现在用统计方法处理随机误差上。

设对某一物理量在相同条件下进行 n 次重复测量, 得到一测量列 x_1, x_2, \dots, x_n , 其算术平均值为

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

则物理量 x 的不确定度 A 分量可由下式计算, 即

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

2. B 类不确定度分量 (简称 B 分量)

B 类不确定度分量是指用非统计的方法评定的不确定度分量, 用 u_B 表示。

B 类不确定度分量在物理实验课中主要体现在对未定系统误差的处理上。计算这类分量时, 不是直接对多次测量的数值进行统计计算, 而是根据误差来源, 先估算出此项的极限误差 Δ , 然后再根据该项误差服从的分布规律而确定出置信系数 C 。在大学物理实验课中, 假定未定系统误差就是实验所用仪器的仪器误差, 所以

$$u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{C} \quad (2-2-3)$$

仪器误差也有一定的分布规律, 最常见的是正态分布和均匀分布。对误差服从正态分布的测量仪器, C 值取 3; 对误差服从均匀分布的测量仪器, C 值取 $\sqrt{3}$ 。

所谓均匀分布是指在测量值的某一范围内, 测量结果取任一可能值的概率相等, 而在该范围外的概率为零。若对某类仪器误差的分布规律一时难以判断, 则可近似地按正态分布处理。

3. 合成不确定度

对同一物理量进行多次重复测量, 测量结果一般都含有 A 类不确定度分量和 B 类不确定度分量。在简单情况下, 如各分量相互独立变化, 则测量结果的合成不确定度可由下式表示

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_{Ai}^2 + \sum_{j=1}^n u_{Bj}^2} \quad (2-2-4)$$

式中, m 和 n 分别是 A 类不确定度分量和 B 类不确定度分量的个数。

计算合成不确定度时, 要注意式中的所有 A 类分量和 B 类分量必须是测同一物理量时的不确定度。否则, 合成不确定度无实际意义。

4. 总不确定度

若以 c 表示置信因子, U 表示总不确定度, 则按照《国际计量局实验不确定度的规定建议书》中的方法可得

$$U = c\sigma \quad (2-2-5)$$

置信因子是与误差分布及置信程度有关的一个概率系数。求总不确定度时, 应首先对误差分布形式作出假设和检验。当取 $c = 1, 2, 3$ 时, 总不确定度 U 的置信概率则分别为 68.3%、95.5% 和 99.7%。一般来说, 在测量结果的后面都要标明所对应的置信概率 (但 $c = 2$ 时可以不标)。

5. 相对不确定度

为表示测量的优劣, 在测量结果中应给出相对不确定度。相对不确定度是总不确定度与最佳估计值的比值。例如, 最佳估计值为 \bar{x} , 总不确定度为 U , 则相对不确定度为

$$E = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2-2-6)$$

2.2.2 直接测量量的结果表示与评价

直接测量是将待测量与标准量进行直接比较,得到待测量的大小。待测量的量纲与标准量的量纲是一致的。为了减小随机误差,直接测一个量时一般要重复测量多次。

若对物理量 x 进行了多次等精度测量,假设可定的系统误差已经消除或修正,则测量结果的表示与评价可按下述方法处理。

1. 相同条件下多次重复测量的情形

当测量次数 n 趋于无穷时,算术平均值 \bar{x} 趋于真值 x_0 。因此,在有限次测量的条件下,用算术平均值作为真值的最佳估计值是合理的。故测量结果可用下式表示

$$x = \bar{x} \pm U \quad (2-2-7)$$

式中, U 表示总不确定度。注意:在测量结果表达式的后面一定要注明物理量的单位。

式(2-2-7)表示的统计意义是,被测量 x 的真值落在 $(\bar{x}-U, \bar{x}+U)$ 区间内的概率为由置信因子 c 确定的值。而相对不确定度可以写为

$$E = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\%$$

2. 单次测量的情形

有时因条件所限,不可能进行多次测量;或者由于仪器精度太低,多次测量读数相同,测量随机误差较小;或者对测量结果的精度要求不高时,往往只进行一次测量。单次测量的结果表示为

$$x = x_1 \pm U \quad (2-2-8)$$

$$E = \frac{U}{x_1} \times 100\% \quad (2-2-9)$$

式中, x_1 为单次测量值; U 为总不确定度。

单次测量无法计算不确定度的 A 分量,故 U 的值仅由不确定度的 B 分量一项决定,即

$$U = c \frac{\Delta_{\text{仪}}}{C} \quad (2-2-10)$$

仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 是参照国家技术标准或检定规程规定的仪器、仪表和器具的准确度等级或允许误差范围,由生产厂家给出或由实验室结合具体测量方法和条件简化的约定。

2.2.3 间接测量量的结果表示与评价

在物理实验中我们遇到更多的还是间接测量的问题。下面就介绍间接测量量的测量结果的表示方法。

设间接测量量 Y 是各直接测量量 x_1, x_2, \dots, x_n 的函数,一般可写为

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2-2-11)$$

各直接测量量的测量结果为

$$\begin{aligned}x_1 &= \bar{x}_1 \pm U_1 \\x_2 &= \bar{x}_2 \pm U_2 \\&\vdots \\x_n &= \bar{x}_n \pm U_n\end{aligned}$$

1. 用间接测量量的平均值作为最佳估计值

可以证明, 间接测量量的平均值可表示为

$$\bar{Y} = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) \quad (2-2-12)$$

上式表明, 只需将各直接测量量的平均值代入函数表达式中, 即可算出间接测量量的平均值。

进一步还可以证明, 在有限次测量的情况下, 间接测量量的平均值即为其最佳估计值。因此, 间接测量量的结果可以表示为

$$Y = \bar{Y} \pm U \quad (2-2-13)$$

$$E = \frac{U}{\bar{Y}} \times 100\% \quad (2-2-14)$$

2. 间接测量量不确定度的估算

为简单起见, 我们假定决定间接测量量的各直接测量量 x_1, x_2, \dots, x_n 彼此独立。那么, 由误差理论可以证明, 间接测量量的总不确定度的计算公式为

$$U = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 U_1^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 U_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n}\right)^2 U_n^2} \quad (2-2-15)$$

相对不确定度的计算公式为

$$E = \sqrt{\left(\frac{\partial(\ln F)}{\partial x_1}\right)^2 U_1^2 + \left(\frac{\partial(\ln F)}{\partial x_2}\right)^2 U_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial(\ln F)}{\partial x_n}\right)^2 U_n^2} \quad (2-2-16)$$

需要指出的是, 以上二式在具体应用时, 要根据间接测量量 Y 与各直接测量量 x_1, x_2, \dots, x_n 的函数关系来考虑: 若 Y 与 x_1, x_2, \dots, x_n 主要是加减关系, 则先计算 U 再计算 E ; 若 Y 与 x_1, x_2, \dots, x_n 主要是乘除关系, 则先计算 E , 再根据 $E = U/\bar{Y}$ 的关系计算 U 。但是不论是用哪种方法, 都应先推导出具体表达式, 然后再代入各直接测量量的有关数据进行数值计算。

间接测量量的结果表示过程可归纳为以下几个步骤:

- (1) 计算各直接测量量的平均值 $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$;
- (2) 计算出各直接测量量的总不确定度 U_1, U_2, \dots, U_n ;
- (3) 将各直接测量量的平均值代入式 (2-2-12) 中, 算出间接测量量的平均值 \bar{Y} ;
- (4) 将各直接测量量的平均值与总不确定度代入式 (2-2-15) 和式 (2-2-16) 中, 计算间接测量量的总不确定度 U 和相对不确定度 E ;