

771
05.1.13
1.2.3.0

21 世纪高等学校系列教材

大学物理实验

李平舟 陈秀华 吴兴林 主编

西安电子科技大学出版社

2002

内 容 简 介

本书是根据“高等工科学学校物理实验基本要求”，结合电子类院校的特点和我们多年教学改革经验编写而成的。编写时，修改了原教材中的大部分内容。从培养重基础、宽口径、高素质、强能力的复合型人才出发，突出了实验与应用的有机结合，详细介绍了科学实验的基本思想、方法和手段。全书分为五部分，重点介绍了绪论、数据处理、基本实验和设计性实验，书的最后附录了常用物理单位及常数。内容涉及实验方法、测量误差、数据处理、力学、光学、电学和现代物理部分。

本书是一本全新概念的新教材，可作为高等院校工科各专业物理实验教材，也可作为成人教育、电视大学、函授大学、职工大学和大专物理实验的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/李平舟, 陈秀华, 吴兴林主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. 2
21 世纪高等学校系列教材
ISBN 7 - 5606 - 1112 - 5

I. 大… II. ①李… ②陈… ③吴… III. 物理学-实验-高等学校-教材 IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 001803 号

责任编辑 李纪澄

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)8227828 邮 编 710071

http: //www. xduph. com E-mail: xdupfxb@pub. xaonline. com

经 销 新华书店

印 刷 西安兰翔印刷厂

版 次 2002 年 2 月第 1 版 2002 年 2 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 15.75

字 数 368 千字

印 数 1~6000 册

定 价 16.00 元

ISBN 7 - 5606 - 1112 - 5/O · 0054(课)

XDUP 1383001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本书封面贴有西安电子科技大学出版社的激光防伪标志, 无标志者不得销售。

前 言

本书是按照原国家教委颁发的“高等工科大学物理实验课程基本要求”，根据电子类院校的特点，为培养重基础、宽口径、高素质、强能力的复合型人才，参照我校多年使用的物理实验教材，对 2000 年编写的教材作了大量修改后完成的。

物理实验是对大学生进行科学实验、科学思想、改造世界技能进行训练的一门必修基础课，是大学生进入大学后实际技能训练的开端，在狠抓素质教育、培养应用型人才的今天，物理实验教学担负着重要任务。我校历来重视实践性教学环节，近年来，为了使物理实验教学达到国内先进水平，学校在资金紧缺的情况下，重点支持物理实验教学，培养教师，改善实验教学的软硬环境，全面建设物理实验中心。本书就是在各种条件具备的基础上编写的，其内容主要包括：绪论、不确定度理论基础、数据处理、有效数字、实验方法、基础实验和设计性实验等。书中的内容基本都是未来学生从事科学研究时，经常用到的基本知识。

实验教学是一项集体的事业，是实验教师集体智慧和辛勤劳动的成果。编者仅对实验教师的成果作了书面整理、总结，其成果权归物理实验中心所有。

本书主要由李平舟、陈秀华、吴兴林编写修改完成。在编写中，张昌民、宋金茂、李德昌、李国平、孙继超、乔俊绒参加了 2000 年教材的部分编写工作和本教材的最后修改讨论，武颖丽、徐克法、张惠玲、徐强、张静涛、朱立忠在最后修改中提出了一些宝贵意见。李平舟对全书修改定稿。

实验教学的探索是无止境的长期任务，书中的新方法、新观点难免有不妥之处，加之由于编写时间仓促，业务水平有限，错误、疏漏之处难免，恳请同行及广大读者提出宝贵意见。本书在编写过程中得到了物理实验中心全体教师及兄弟院校的支持，特别是理学院院长吴振森、郭立新；西安交大王红理；西北工业大学李恩谱；西安建筑科技大学史鹏；退休教师钟承奕、邓鸿鸣、伍永泉的大力支持，在此表示衷心的感谢。

西安电子科技大学物理实验中心
2001 年 12 月

目 录

I 绪论	1
1-1 物理实验课的地位与作用	1
1-2 课程的目的与要求	1
1-3 实验程序	1
II 基本概念与数据处理	3
2-1 测量	3
2-2 误差	4
2-3 不确定度	10
2-4 测量结果和不确定度的确定	11
2-5 有效数字	14
2-6 数据处理方法	16
习题	25
III 基础实验	29
实验 1 用拉伸法测量杨氏弹性模量	30
实验 2 用三线摆测量刚体的转动惯量	35
实验 3 压力传感器特性的研究	39
实验 4 电表的改装与校准	46
实验 5 灵敏电流计特性的研究	52
实验 6 放电法测高阻	58
实验 7 薄透镜焦距的测定	61
实验 8 分光计的调节和使用	67
实验 9 单缝衍射的光强分布	73
实验 10 交直流电桥测 R 、 L 、 C	77
实验 11 用冲击法测螺线管磁场	82
实验 12 用霍尔元件测量磁场	88
实验 13 弦振动的研究	93
实验 14 声速的测量	97
实验 15 用光栅测量光波波长	102
实验 16 迈克尔逊干涉仪	106
实验 17 光的等厚干涉现象的研究	112
实验 18 光的偏振现象的研究	118
实验 19 光电效应	123
实验 20 用电流场模拟静电场	127
实验 21 长度与体积的测量	132

实验 22	光学全息照相的基本技术	141
实验 23	示波器的使用	149
实验 24	电源输出功率的研究	157
实验 25	用电热法测量热功当量	163
实验 26	弱电流的放大	163
实验 27	用瑞利干涉仪测空气折射率	169
实验 28	阿贝成像原理和空间滤波	173
实验 29	光磁共振	179
IV 设计性实验		189
实验 1	重力加速度的研究	191
实验 2	用焦利氏秤测弹簧的倔强系数	192
实验 3	简谐振动的研究	192
实验 4	物体密度的测定	193
实验 5	液体粘滞系数的测定	193
实验 6	液体表面张力系数的测定	194
实验 7	用光的衍射法测杨氏模量	194
实验 8	用凸透镜测狭缝宽度	195
实验 9	替代法测电阻	196
实验 10	伏安法测电阻	196
实验 11	非线性电阻特性的研究	197
实验 12	微安表内阻的测定	197
实验 13	变阻器的使用与电路控制	198
实验 14	比较法测互感系数	198
实验 15	用补偿法、电桥伏安法测电阻	199
实验 16	用非平衡电桥法测热敏电阻	199
实验 17	用恒流源法测导体电阻温度系数	200
实验 18	温差电动势的测量	200
实验 19	用电谐振法测膜层厚度	201
实验 20	RC 串联电路暂态过程的研究	202
实验 21	用干涉法测量载流康铜丝的温度	202
实验 22	用霍尔器件测量地磁水平分量	203
实验 23	温度传感器的设计与应用	203
实验 24	自感现象演示电路的设计	204
实验 25	硅光电池特性的研究	204
实验 26	用示波器测量谐振频率和电感	205
实验 27	测电源的电动势和内阻	205
实验 28	用磁聚焦法测定电子荷质比	206
实验 29	用电子积分器测电容	206
实验 30	数字高斯计的设计	207

实验 31	光电传感器的设计与应用	207
实验 32	暂态过程的实时测量及曲线图的描绘	208
实验 33	用计算机测绘磁场分布	208
V	附录	211
附录 A	物理实验中心开设选修课介绍	211
附录 B	我国法定计量单位表	213
附录 C	常用物理量的代号和国际制导出单位	215
附录 D	英美度量衡折合国际公制、市制换算表	216
附录 E	常用物理量的代号和国际制导出单位	217
附录 F	一般常用符号	218
附录 G	国际单位制中的辅助单位和导出单位	220
附录 H	SI 词头	221
附录 I	常用物理数据	222
I. 1	基本物理常量(1986 年国际推荐值)	222
I. 2	20 °C 时物质的密度	223
I. 3	标准大气压下不同温度时纯水的密度	224
I. 4	水在不同压强下的沸点	224
I. 5	流体的动力粘度	225
I. 6	20 °C 时常用金属的杨氏模量 $Y(\text{N/mm}^2)$	225
I. 7	海平面上不同纬度处的重力加速度	225
I. 8	物质中的声速	226
I. 9	物质的比热容	226
I. 10	金属和合金的电阻率及其温度系数	227
I. 11	常用热电偶的温差电动势	227
I. 12	物质的相对介电常数 ϵ_r	232
I. 13	物质的折射率 n	232
I. 14	常用光源的谱线波长/mm	234
I. 15	几种纯金属的“红限”波长 λ_0 及逸出功 W	234
附录 J	电磁学实验常用仪器	235
J. 1	电表	235
J. 2	电阻箱与滑线变阻器	236
J. 3	直流标准电阻	239
J. 4	电源	239
J. 5	J2462 型低频信号发生器	240
J. 6	GB - 9B 型电子管毫伏表	241
J. 7	常用器件符号	242

I 绪 论

1 - 1 物理实验课的地位与作用

物理学是研究客观世界物质运动规律的学科，研究的基本方法是科学实验。科学实验的过程分为三个阶段：

- (1) 观察现象；
- (2) 分析现象产生和发展的条件；
- (3) 建模，即找到物质运动的规律，建立相关理论和模型。

在科学实验中，往往还夹杂和预示着某些有待发现的规律。因此，一个科学工作者不但要知识面宽、素质高，会做科学实验，能分析和解决问题，还应具有创造性，应细心和有耐心……大学物理实验是培养学生基础应用综合能力和高素质科技人才的重要基础课。

1 - 2 课程的目的与要求

大学物理实验的重要任务是验证物理规律、锻炼动手能力、学习数据处理、培养严谨作风、提高综合素质。在课程安排上，通过做一系列实验，使学生对科学实验有一个初步了解。同时，在实验方法、测量技术、数据采集和处理等方面接受基本训练。具体要求掌握：

- (1) 七项操作技术：零位校准、水平调节、铅直调整、光路共轴调节、逐次逼近调节、视差消除、电路接线训练等。
- (2) 六种实验方法：比较法、放大法、转换法、模拟法、补偿法、干涉法。
- (3) 常用物理量测量：长度、时间、质量、力、温度、热量、电流强度、电压、电阻、磁感应强度、折射率等。
- (4) 常用仪器的使用：测长仪、计时器、测温仪、变阻器、电表、直流电桥、电位差计、通用示波器、低频信号发生器、分光计、常用电源、常用光源等。

1 - 3 实 验 程 序

主要分为实验预习、实验操作、实验分析、实验报告等。

1. 实验预习

实验预习的要求是要在课前认真阅读要做的实验，写出实验预习报告。预习报告的内

容主要有：

- (1) 实验目的：明确实验要达到的要求。
- (2) 实验仪器：根据讲义写出实验所用主要仪器。
- (3) 实验原理：简要叙述实验原理、写出测量公式、画出原理图、电路图等。
- (4) 内容和步骤：根据实验写出步骤。
- (5) 画出实验数据表格：根据实验内容要求设计出数据记录表格。

2. 实验过程

根据实验讲义的要求，在教师指导下自行完成实验。在做实验过程中，遇到没有搞清楚或不能解决的问题，要与教师协商，直到搞清楚每个实验细节问题。在做完实验后，要仔细分析实验结果，总结实验过程，对还不清楚的问题请教师回答，在没有任何疑难问题后，请教师审阅实验数据并签字；在教师签字认可后，可以整理实验仪器，离开实验室。值日生主要负责打扫实验室卫生。

3. 实验报告

实验报告具体要求有：

- (1) 实验名称：所做实验的名称。
- (2) 实验时间：具体做实验的时间。
- (3) 实验学生：做实验者本人姓名。
- (4) 指导教师：指导实验的教师姓名。
- (5) 实验目的：完成本实验应达到的基本要求。
- (6) 实验仪器：所用仪器的名称和型号。
- (7) 实验原理：简述原理，包括简单的公式推导，原理图或电路图。
- (8) 实验内容和步骤。
- (9) 数据处理：有数据表格、必要的计算过程、实验曲线(必须用坐标纸作图)、写出结果的标准形式。
- (10) 问题讨论：分析总结实验得失，完成课后讨论题。

注：实验报告是评判实验考试成绩的重要依据之一。实验报告要求内容完整，贴有封面，装订成册，并且附上预习报告(有原始数据和教师签字)。实验报告在实验课后完成，完成全部实验后按顺序装订成册，在下次实验时交任实验课老师批阅。

II 基本概念与数据处理

人类是通过测量来认识客观世界的。物理实验离不开对物理量的测量。由于测量条件的非理想化，测量总存在有误差。误差是测量中的不可靠量值。导致测量结果的不可靠量值称为不确定度。这就是测量、误差和不确定度三者之间的因果关系。测量误差越小，结果的不确定度就越小，测量精度就越高，人们对客观世界的认识也就越准确。

2 - 1 测 量

1. 测量的定义

广义而言，测量就是用实验手段对客观事物获取定量信息的过程。具体地说，测量就是将待测量与标准量进行比较，确定被测量的量值。通俗地讲，就是借助仪器、用某一计量单位把待测量的大小表示出来，确定待测量是该计量单位的多少倍。测量数据要写明数值的大小和计量单位。

2. 测量的类型

1) 按测量方式区分测量的类型

按测量方式可分为直接测量和间接测量：

① 直接测量：用测量仪器能直接测出被测量的量值的测量过程称为直接测量。相应的被测量称为直接测量量。例如，用米尺测物体的长度，用天平称物体的质量，用秒表测时间等，这些均是直接测量。相应的长度、质量、时间等均称为直接测量量。直接测量按测量次数分为单次测量和多次测量。

- 单次测量：只测量一次的测量称为单次测量。单次测量主要用于测量精度要求不高、测量比较困难或测量过程带来的误差远远大于仪器不确定度的测量中。例如，在测量杨氏弹性模量实验中，测钢丝长度就用的是单次测量。

- 多次测量：测量次数超过一次的测量称为多次测量。多次测量按测量条件主要分为等精度测量和非等精度测量。

② 间接测量：对于某些物理量的测量，由于没有合适的测量仪器，不便或不能进行直接测量。间接测量只能先测出与待测量有一定函数关系的直接测量量，再将直接测量的结果代入函数式进行计算，得到待测物理量的测量值，这个过程称为间接测量。即先进行直接测量，然后经过一定的数学运算才能得到测量结果的测量过程称为间接测量。相应的被测量称为间接测量量。例如，用单摆法测量重力加速度，其公式为 $g = 4\pi^2 L / T^2$ 。可以先用米尺和计时器对 L 和 T 分别进行直接测量；然后将 L 和 T 的值代入测量公式，计算出重

力加速度 g 。整个过程称为间接测量。其中, g 是间接测量量, L 、 T 是直接测量量。

2) 按测量条件区分测量的类型

按测量条件可分为等精度测量和非等精度测量:

① 等精度测量: 在同等条件下进行的多次重复性测量称为等精度测量。即环境、人员、仪器、方法等相同不变, 对同一个待测量进行多次重复测量。由于各次测量的条件相同, 测量结果的可靠性是相同的, 测量精度也是相同的, 这些测量就是等精度测量。

② 非等精度测量: 在特定的不同测量条件下, 用不同的仪器、不同的测量方法、不同的测量次数、派不同的人员进行测量和研究, 这种测量叫做非等精度测量。主要用于高精度的测量中。

在实际测量中, 常用的测量主要是单次测量、等精度测量和间接测量。当测量精度要求不高时用单次测量, 测量精度要求比较高时用等精度测量, 在无法使用直接测量时才用间接测量。

3. 测量的方法

测量的方法很多, 常用的有: 直读测量法、比较测量法、替代测量法、放大测量法、平衡测量法、模拟测量法、几何光学测量法、干涉测量法和衍射测量法等等。

2 - 2 误 差

1. 误差的定义

误差定义为测量值和真值之差。按表达方式分为绝对误差和相对误差。

(1) 绝对误差:

$$\delta_x = x - x_0 \quad (2-2-1)$$

式中, δ_x 表示绝对误差, x 表示测量值, x_0 表示真值。

绝对误差反映了测量的准确度。由于误差存在于一切测量过程中, 真值虽然是客观存在的实际值, 但无法得到。因此, 在等精度测量中常用测量值和平均值之差估算绝对误差。其表达式为

$$\delta_x = x - \bar{x} \quad (2-2-2)$$

在估算绝对误差时, 有时用被测量的公认值、理论值或更高精度的测量值来代替真值 x_0 , 这些值叫做“约定真值”。

(2) 相对误差:

$$E = \left| \frac{\delta_x}{x_0} \right| \times 100\% \quad (2-2-3)$$

相对误差用绝对误差和真值之比的绝对值(百分数)表示, 也称百分误差。

2. 误差的类型及处理方法

测量中误差按其产生的条件可归纳为: 系统误差、随机误差和粗大误差三类。

1) 系统误差

在对同一物理量进行多次等精度测量时,误差为常数或以一定规律变化的误差称为系统误差。系统误差分为可定系统误差和未定系统误差。

可定系统误差:在测量中大小和正负可确定的误差。测量中应消除掉该误差。例如,米尺零刻度线被磨损或弯曲,若不注意,会产生零点不为零的可定系统误差。因此,测量时应该避开零刻度线,用中间的某整刻度线作为测量的起始点,再读出被测物的终止点,两点相减就避开了零点不准的可定系统误差。再如,千分尺(亦称螺旋测微器)零点不为零,测量时应先记下零点值 d_0 ,再测量被测量值的大小 d_1 ,两者相减($d_1 - d_0$)的结果就消除了千分尺 d_0 的可定系统误差。

未定系统误差:测量中只能确定大小,不能确定正负的误差(如仪器不确定度产生的测量误差),将其合成到测量结果的不确定度中。例如,千分尺的示值误差、数字毫秒计的不确定度、分光计的不确定度、电表的精度(即准确度等级)等产生的测量误差都是未定系统误差。

产生系统误差的原因有:

① 由仪器不确定度产生的系统误差:即仪器本身缺陷、校正不完善或没有按规定条件使用而产生的误差。例如,仪器刻度不准、刻度盘和指针安装偏心、米尺弯曲、天平两臂不等长等等。

② 由测量公式产生的系统误差:测量公式本身的近似性或没有满足理论公式所规定的实际条件而产生的误差。例如,单摆周期公式 $T = 2\pi \sqrt{l/g}$ 的成立条件是摆角小于 5° ,用这个近似公式计算 T 时,计算本身就带来了误差;又如,用伏安法测量电阻时,忽略了电表内阻的影响等。

③ 由测量环境产生的系统误差:在测量过程中,因周围温度、湿度、气压、振动、电磁场等环境条件发生有规律的变化引起的误差。例如,在 25°C 时标定的标准电阻在 30°C 环境下使用等。

④ 由操作人员产生的系统误差:操作者坏习惯或生理、心理等因素造成的误差。例如,用米尺测长,读数为斜视读出;用秒表计时,掐表速度较慢等。

发现系统误差的方法有:

① 理论分析法:从原理和测量公式上找原因,看是否满足测量条件。例如,用伏安法测量电阻时,实际中电压表内阻不等于无穷大、电流表内阻不等于零等,都会产生系统误差。

② 实验对比法:改变测量方法和条件,比较差异,从而发现系统误差。例如,调换测量仪器或操作人员,进行对比,观察测量结果是否相同从而进行判断确认。

③ 数据分析法:分析数据的规律性,以便发现误差。例如残差法,对一组等精度测量数据,通过计算偏差,观察其大小和比较正、负号的数目,可以寻找系统误差。

可定系统误差的消除和减小方法有:

① 交换法:用天平两次称衡一物体质量时,第二次称衡将被测物与砝码交换。两次称量结果分别为 m_1 、 m_2 ,则取 $m = \sqrt{m_1 m_2}$ 为最终称量结果,可以克服天平不等臂误差。

② 替代法：如图 2-2-1 所示，在电表改装实验中测量表头 G 的内阻时，闭合 S_1 ，将 S_2 与表头 G 回路接通，调节 R_1 使 μA 表指到整刻度，记下该电流值；再将 S_2 与电阻箱 R_2 回路接通，保持 R_1 不变，调节电阻箱 R_2 阻值，使 μA 表和记下的电流值相同，此时电阻箱 R_2 的阻值就等于被测表头 G 的内阻。这种方法避免了测量仪器 μA 表内阻引入的误差。

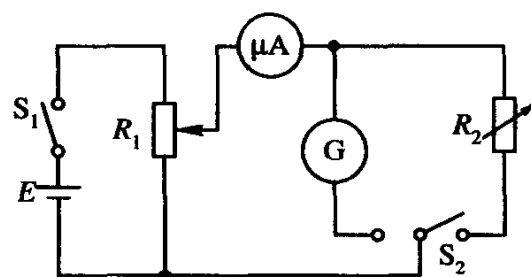


图 2-2-1 用替代法测电表内阻电路图

③ 零示法：零示法是在指零仪器两端等电位(即示零)时测量，以减小仪器误差和避免指零仪器内阻引入的误差。电桥、电位差计均采用这种方法。

④ 异号法：在霍尔效应实验中，改变霍尔片上的电流方向进行测量，以消除不等位误差。

⑤ 半周期法：对以圆心为转轴， 360° 周期性变化的系统误差，利用间隔 180° 双游标偶次测量，取平均值的方法，可消除偏心误差。如分光计等测角仪器。

2) 随机误差

随机误差是指在多次等精度测量中，误差变化是随机的，忽大忽小，忽正忽负，没有规律；当测量次数比较多时就满足一种规律——统计规律。最常见的就是正态分布(也称高斯分布)，如图 2-2-2 所示。满足高斯方程：

$$f(\delta_x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\delta_x}{\sigma}\right)^2} \quad (2-2-4)$$

(1) 正态分布的特性。高斯方程中 σ 称为标准差，是随机误差 δ_x 的分布函数 $f(\delta_x)$ 的特征量。其表达式为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2} \quad (2-2-5)$$

从式(2-2-4)可见， σ 确定， $f(\delta_x)$ 就惟一地确定了；反之， $f(\delta_x)$ 确定， σ 的大小也就惟一地确定了。 σ 越小，测量精度越高。曲线越陡，峰值越高，随机误差越集中，测量重复性越好； σ 越大则反之。 σ 对 $f(\delta_x)$ 的影响示意图如图 2-2-3 所示。

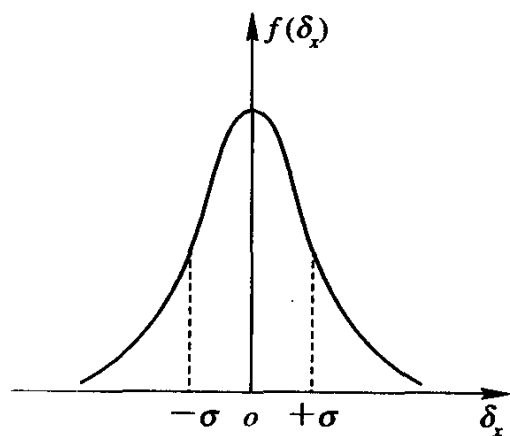


图 2-2-2 正态分布曲线图

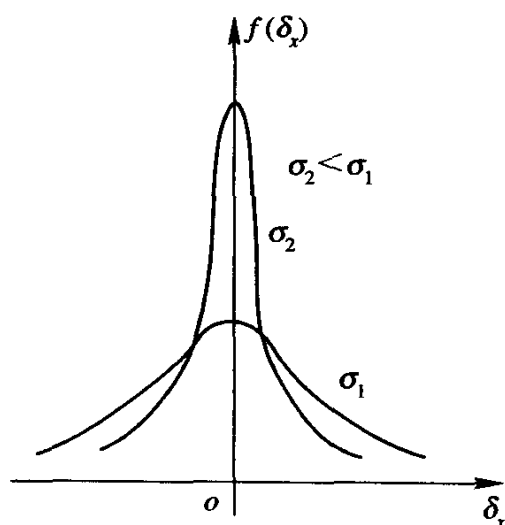


图 2-2-3 σ 对 $f(\delta_x)$ 的影响示意图

为了统计随机误差的概率分布,将概率密度函数在以下区间积分,得到随机误差在相应区间的概率值分别为:

$$P(-\infty, +\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta_x) d(\delta_x) = 1$$

$$P(-\sigma, +\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\delta_x) d(\delta_x) = 68.3\%$$

$$P(-2\sigma, +2\sigma) = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(\delta_x) d(\delta_x) = 95.4\%$$

$$P(-3\sigma, +3\sigma) = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(\delta_x) d(\delta_x) = 99.7\%$$

由上式可以看出,随机误差落在 $\pm 3\sigma$ 之外的概率仅为0.3%,是正常情况下不应该出现的小概率事件,因此将 $\pm 3\sigma$ 定为误差极限,即 $|\delta_{x_i}| > 3\sigma$ 时的 x_i 为坏值。

正态分布具有四个重要特性,分别为:

单峰性:小误差多而集中,形成一个峰值。该值出现在 $\delta_x = 0$ 处,即真值出现的概率最大。

对称性:正负误差出现的概率相同。

有界性: $|3\sigma|$ 为误差界限。

抵偿性:正负误差具有抵消性。当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\bar{\delta}_x \rightarrow 0$, $\bar{x} \rightarrow x_0$ 。因此,对随机误差的处理方法是采取多次测量,取算术平均值作为测量结果,以减小随机误差,提高测量精度。

(2) 测量列的标准差。高斯方程中的标准差 σ 是理论值,当 $n \rightarrow \infty$ 时,才趋于高斯分布。在实际测量中,只能进行有限次测量,而有限次测量的随机误差实际遵从t分布。t分布曲线较高斯分布曲线稍低而宽,两边较高,两者形状非常相近,如图2-2-4所示。实验中,先用贝赛尔(Bessel)公式计算测量列的标准偏差

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-2-6)$$

然后,用t分布因子对标准偏差进行修正,估算出测量列的标准差

$$\sigma = S \times t_{0.683} \quad (2-2-7)$$

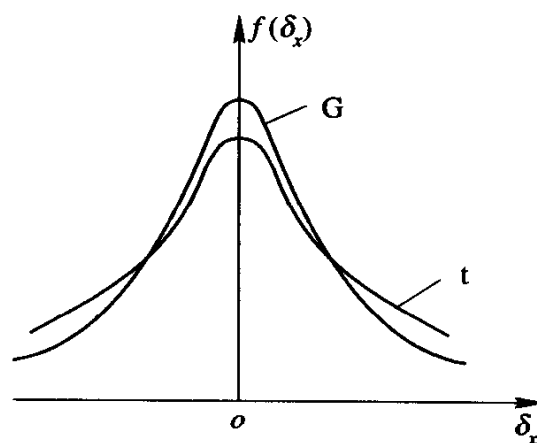


图 2-2-4 t 分布与高斯分布曲线的比较示意图

表 2-2-1 实验中常用的 t 因子

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	∞
$t_{0.683}$	1.84	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	...	1

在测量次数选择时,要注意t因子的修正。由表2-2-1可见, $n=6$ 是拐点;当 $n > 6$ 时,t的变化小而缓慢,可取:

$$\sigma \approx S \quad (n \geq 6) \quad (2-2-8)$$

(3) 平均值的标准差。平均值也是个随机变量，服从正态分布。如果对某被测量 x 进行多组多次等精度测量，每组测量列的平均值为 $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots$ 等不尽相同，只是随机误差已很小。由最小二乘法可证明，平均值是真值的最佳估计值，因此实验中只需对被测量进行一组等精度测量。其平均值的标准差

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = t \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-2-9)$$

下面用最小二乘法证明测量列的平均值是真值的最佳估计值。

求一组等精度测量列的最佳值，就是求能使它与各次测量值之差的平方和为最小的 x_{opt} 值。用 x_{opt} 表示真值的最佳估计值，即求式 $\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{opt}})^2$ 取最小值时的 x_{opt} 。为满足极小值条件，应对上式求一阶导数并令其等于零和求二阶导数并判断其是否大于零，它们分别是：

$$f' \left[\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{opt}})^2 \right] = 0$$

$$f'' \left[\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{opt}})^2 \right] = 2n > 0$$

二阶导数大于零，说明求出的极值为极小值。

解一阶导数等于零的等式： $-2 \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{opt}}) = 0$ ，因而有

$$\sum_{i=1}^n x_i = nx_{\text{opt}}$$

则

$$x_{\text{opt}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

由以上证明可以看出，真值的最佳估计值是平均值。

3) 粗大误差

粗大误差又简称粗差，是由于实验者粗心大意或环境突发性干扰而造成的，该测量值为坏值。在处理数据时不能将坏值计算在内，应予以剔除。具体做法是：求出 $\bar{x}$ 和 σ ，将 $|\delta_{x_i}|$ 与 3σ 进行比较，大于 3σ 的测量值都是坏值，应剔除掉。这种方法称为 3σ 法则。

在测量中，若一组等精度测量值中的某值与其他值相差很大。找一下原因，判断是否是粗差引起的。若是，则将其剔除；若找不出原因或无法肯定，就先求出所有测量值（包括可疑坏值）的标准差，然后用 3σ 法则判断并剔除。用剩余的数据重新计算 σ ，再进行检验，直到没有坏值，才能计算、分析测量结果。当怀疑有坏值时要多测几个数据。

例 1 对液体温度作多次等精度测量，测量值分别为 20.42, 20.43, 20.40, 20.43, 20.42, 20.43, 20.39, 20.30, 20.40, 20.43, 20.42, 20.41, 20.39, 20.39, 20.40。试用 3σ 法则检验该测量列中是否有坏值，并计算检验后的平均值及标准差。

解 实验数据和处理过程如表 2-2-2 所示：

表 2-2-2

i	$t (^{\circ}\text{C})$	$ \delta_x (^{\circ}\text{C})$
1	20.42	0.016
2	20.43	0.026
3	20.40	0.004
4	20.43	0.026
5	20.42	0.016
6	20.43	0.026
7	20.39	0.014
8	20.30	0.104
9	20.40	0.004
10	20.43	0.026
11	20.42	0.016
12	20.41	0.006
13	20.39	0.014
14	20.39	0.014
15	20.40	0.004
平均值	20.404	

表中计算的中间过程数据可以多取一位。

计算测量列的标准差： $\sigma=0.03^{\circ}\text{C}$ ， $3\sigma=0.09^{\circ}\text{C}$ 。

判断和剔除： $i=8$ 时的 $|\delta_x|=0.104>3\sigma$ ，所以 $t=20.30^{\circ}\text{C}$ 是坏值，予以剔除。剔除后 $\bar{t}=20.411^{\circ}\text{C}$ ， $\sigma=0.016^{\circ}\text{C}$ ， $\sigma_i=0.004^{\circ}\text{C}$ 。经检验已再无坏值。

3. 关于定性评价测量的三个名词

- (1) 准确度：表示测量值偏离真值的程度，反映系统误差对测量结果的影响。
- (2) 精密度：表示测量值的分散程度，反映随机误差对测量结果的影响。
- (3) 精确度：表示测量值的重复性以及和真值的偏离度，反映系统误差和随机误差对测量结果的共同影响。

图 2-2-5 所示为打靶时着弹点的分布情况。由图可见：图(a)准确度低，精密度高；图(b)准确度高，精密度低；图(c)精确度高，既准确又精密。

由于三词是定性评价测量结果的，有时也不严格区分，均称其为精度。

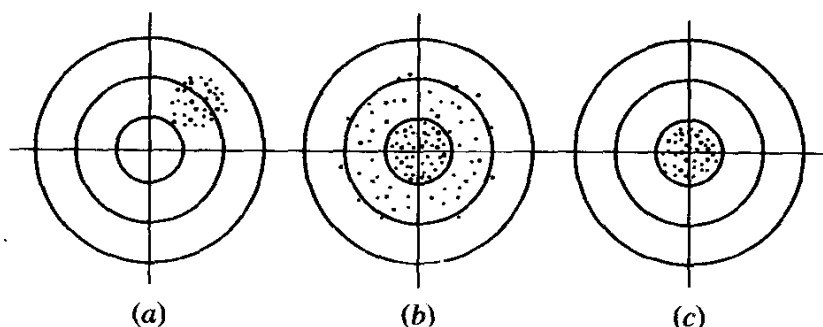


图 2-2-5 准确度、精密度、精确度示意图

2-3 不 确 定 度

1. 不确定度的定义

不确定度是由于测量误差的存在而造成对被测量值不能确定的程度。若被测量用 X 表示, 则不确定度用符号 ΔX 表示。它是由用统计方法估算 A 类分量 ΔX_A 和用非统计方法估算的 B 类分量 ΔX_B 两部分组成。

$$\text{表达式} \quad \Delta X = \sqrt{\Delta X_A^2 + \Delta X_B^2} \quad (2-3-1)$$

$$\text{相对不确定度} \quad \frac{\Delta X}{X} \times 100\% \quad (2-3-2)$$

2. 不确定度的两个分量

A 类分量: ΔX_A 是对随机误差的统计处理, 常用平均值的一倍标准差估算;

B 类分量: ΔX_B 是对未定系统误差大多按均匀分布进行的非统计处理, 换算成与一倍标准差有相同置信概率的分量。

ΔX_A 、 ΔX_B 应具有同等的置信概率。(在物理实验中, 一般取 $P=0.683$ 。)

3. 仪器的不确定度 ΔX_{yi}

仪器是一种产品, 产品是一个结果, 它的不可靠量值应该是不确定度 ΔX_{yi} (以前称仪器误差)。它在测量中产生未定系统误差, 该误差大多服从均匀分布, 如图 2-3-1 所示, 即误差大小和符号的概率均相等。

将仪器不确定度 ΔX_{yi} 合成到测量结果的不确定度中为 B 类分量:

$$\Delta X_B = \frac{\Delta X_{yi}}{\sqrt{3}} \quad (P = 0.683) \quad (2-3-3)$$

仪器不确定度的获得:

① 由仪器或说明书中给出。(有的仪器在铭牌上已经标明了仪器的不确定度。)

② 由仪器的准确度等级获得:

$$\Delta X_{yi} = \frac{\text{准确度等级} \times \text{量程}}{100}$$

仪器的准确度等级由高到低排列为: 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 级, 共七个等级。其中, 0.1、0.2 属正态分布, $\Delta X_B = \Delta X_{yi}/3$; 其余均为均匀分布, $\Delta X_B = \Delta X_{yi}/\sqrt{3}$ 。

③ 估计:

连续读数的仪器取 $\Delta X_{yi} = \frac{1}{2}$ 分度值。

非连续读数的仪器取 $\Delta X_{yi} =$ 分度值。

数字式仪表 ΔX_{yi} 取末位 ± 1 或 ± 2 。

在实验室中, 连续读数的仪器有米尺、螺旋测微器、测量显微镜、光具座、指针式电表

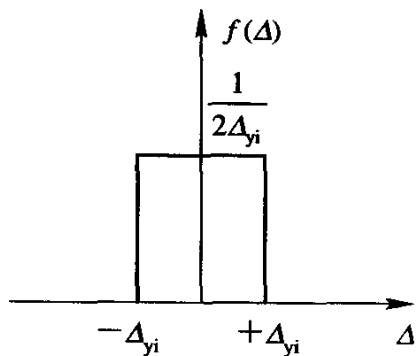


图 2-3-1 均匀分布示意图

等；非连续读数仪器有：游标卡尺、分光计、电阻箱、机械秒表等；数字式仪表有数字式电压表、数字式电流表、数字式欧姆表、数字式频率计等。

注：分度值就是仪器最小测量单位的量值。例如，米尺的分度值是 1 mm，JJY 分光计的分度值是 1'。

2-4 测量结果和不确定度的确定

1. 单次直接测量

在某些精度要求不高或条件不许可的情况下，只需要进行单次测量。在实验中，先重复性测量三次，如果测量值相等，说明测一次就行了。则

$$\Delta X_A = 0$$

$$\Delta X_B = \frac{\Delta X_{yi}}{\sqrt{3}}$$

测量结果和不确定度如下：

测量结果 X_1

不确定度 $\Delta X = \sqrt{\frac{1}{3}} \Delta X_{yi}$

在物理实验中，系统误差大多是均匀分布的。

2. 多次直接测量

通常测量都要进行重复多次，以便于提高测量精度。一般选取测量次数 $n \geq 6$ ，以便于满足 $\sigma \approx S (t \approx 1)$ ，简化 ΔX_A 的计算。数据处理前应该消除掉可定系统误差和剔除掉粗大误差，再进行下面的分析计算：

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

不确定度
$$\Delta X = \sqrt{\Delta X_A^2 + \Delta X_B^2} = \sqrt{(\sigma_x)^2 + \left(\frac{\Delta X_{yi}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\frac{t^2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 + \frac{\Delta X_{yi}^2}{3}} \quad (2-4-1)$$

3. 间接测量

间接测量值是把直接测量的结果带入函数关系式(即测量公式)计算而得到的。由于直接测量有误差，导致间接测量也有误差。间接测量结果的不确定度取决于直接测量结果的不确定度和测量公式的具体形式。分析如下：

被测量的函数关系式： $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为各自独立的直接测量量。

测量结果： $\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ 。

间接测量不确定度：对被测量的函数关系式进行全微分，求出结果的不确定度。为使微分简化，具体分为两种形式表示。

① 当测量公式为和差形式时：