

主编  
胡承忠  
杨兆华

# 物理实验指导

# WULI SHIYAN ZHIDAO

21 世纪高等院校教材

# 物理实验指导

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 主 编 | 胡承忠 | 杨兆华 |
| 副主编 | 封百涛 | 吴晓梅 |
|     | 姜春玲 | 徐现刚 |

山东大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

物理实验指导/胡承忠,杨兆华主编. —济南:山东大学出版社,2009.10

ISBN 978-7-5607-3956-4

I. 物…

II. ①胡…②杨…

III. 物理学—实验—高等学校—教学参考资料

IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 177481 号

山东大学出版社出版发行

(山东省济南市山大南路 27 号 邮政编码:250100)

山东省新华书店经销

山东新华印刷厂印刷

787×1092 毫米 1/16 28.25 印张 651 千字

2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷

定价: 60.00 元

**版权所有,盗印必究**

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社营销部负责调换

## 内容提要

本书是根据《高等工科学学校物理实验基本要求》，按照教育部教学示范中心建设和为培养“重基础、宽口径、高素质、强能力”复合型人才的要求，结合我院物理实验课程建设多年来的实践经验编写而成。

物理实验是理工科学生进入大学后系统学习基本实验知识、试验方法和实验技能的开端，是我国普通高等院校为培养大学生科学素质、动手能力和开拓创新精神而开设的一门以实验为主要内容的首门课程，特别是在当今社会，大力提倡创新精神，发掘创新型人才的一门必修课程。

全书包括实验误差处理、力学、热学、电磁学、光学、近代物理、模拟电子技术、数字电子技术、高频电路、电路分析、EDA、微机原理、信号与系统、通信原理等 19 章。本书充分反映物理实验及教学改革成果及其发展趋势，内容完整，积极探索理论与实践结合的课程体系，注重教学内容的系统性和实验技能的严格训练。在精选基本实验的基础上，大力宣传具有现代意识及高新技术色彩的给学生留有较大发展空间的实验项目。

本书系高等学校各理工类专业的实验用书，各专业可根据自己专业特点选择实验个数和项目，也可供各类职业院校选用。

# 前 言

全书共分为 19 章,第一章讲述误差理论,依次是力学、热学、电磁学、光学、近代物理实验、模拟电子技术、数字电子技术等。共编 166 个实验。可以根据不同的需要和不同的培养计划组织教学。根据教学改革的需要,本书有以下几个方面的特点:

(1)涵盖面广,由于实验项目多,可以根据专业特点,灵活掌握。

(2)实验的类别多,试验可分为验证性实验、基础实验、综合性实验、近代物理实验、设计性实验等,教师可根据学生专业需求选择实验类别。

(3)选题方面考虑到各专业的通用性、实用性、科学性和时代性,以供因材施教。内容安排遵循由浅入深、先易后难和循序渐进的原则。

本书是由泰山学院物理实验教学的任课教师编写而成,而实验室建设的完善是广大教师长期共同努力的结果。我代表编写组向给本书提供材料的所有老师表示感谢!同时,本书还参阅了兄弟院校的教材,吸收了精华,在此一并表示感谢!

由于编者水平有限,书中难免有缺点和错误,恳请批评指正,以便改进。

编 者  
2009 年 8 月

# 目 录

|                            |      |
|----------------------------|------|
| 第一章 实验误差理论基础 .....         | (1)  |
| 第二章 力学实验部分 .....           | (14) |
| 实验一 长度与体积的测量 .....         | (14) |
| 实验二 单 摆 .....              | (14) |
| 实验三 牛顿第二定律的验证 .....        | (18) |
| 实验四 物理天平测质量和密度 .....       | (19) |
| 实验五 三线摆 .....              | (21) |
| 实验六 弦振动和驻波实验 .....         | (24) |
| 实验七 验证动量守恒定律 .....         | (25) |
| 实验八 用刚体转动惯量仪测转动惯量 .....    | (27) |
| 实验九 杨氏模量的测量 .....          | (29) |
| 实验十 研究简谐振动的规律 .....        | (32) |
| 第三章 热学部分 .....             | (35) |
| 实验一 冷却法测定金属比热容 .....       | (35) |
| 实验二 热功当量实验 .....           | (37) |
| 实验三 用落球法测定液体的黏滞系数 .....    | (40) |
| 实验四 稳态法测量不良导体的导热系数 .....   | (42) |
| 实验五 固体线膨胀系数的测定 .....       | (46) |
| 实验六 液体表面张力系数的测定 .....      | (48) |
| 实验七 冰的溶解热的测定 .....         | (49) |
| 第四章 电磁学实验部分 .....          | (52) |
| 实验一 伏安法测电阻及二极管伏安特性曲线 ..... | (52) |
| 实验二 静电场的描绘 .....           | (56) |
| 实验三 惠斯登电桥测电阻 .....         | (62) |
| 实验四 低电阻测量 .....            | (63) |
| 实验五 测定螺线管内的磁场 .....        | (67) |
| 实验六 万用表设计与校准实验 .....       | (70) |
| 实验七 示波器原理和使用 .....         | (77) |
| 实验八 $RLC$ 电路的暂态过程 .....    | (85) |

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| 实验九 电子束线的偏转和聚焦 .....            | (93)  |
| 实验十 用新型十一线电位差计测量电动势 .....       | (98)  |
| <b>第五章 光学实验部分</b> .....         | (104) |
| 实验一 分光计的调节及棱镜顶角的测定 .....        | (104) |
| 实验二 薄透镜焦距的测定 .....              | (108) |
| 实验三 光学材料折射率的测定 .....            | (110) |
| 实验四 550 型焦距仪的原理和应用 .....        | (112) |
| 实验五 透镜组基点的测定 .....              | (114) |
| 实验六 等厚干涉法测球面的曲率半径 .....         | (116) |
| 实验七 迈克尔逊干涉仪的调节及干涉现象的观察与测量 ..... | (119) |
| 实验八 单缝衍射及光强分布测量 .....           | (124) |
| 实验九 用双棱镜测定光波波长 .....            | (127) |
| 实验十 光栅特性及光波波长的测定 .....          | (130) |
| 实验十一 偏振现象的观察与测量 .....           | (133) |
| 实验十二 光电效应及普朗克常数的测定 .....        | (135) |
| 实验十三 阿贝成像原理和空间滤波 .....          | (140) |
| <b>第六章 模拟电子技术实验部分</b> .....     | (143) |
| 一、概 述 .....                     | (143) |
| 二、主要技术性能 .....                  | (143) |
| 三、使用方法及说明 .....                 | (144) |
| 四、使用注意事项 .....                  | (144) |
| 五、实验基本要求 .....                  | (145) |
| 实验一 常用电子仪器的使用 .....             | (145) |
| 实验二 晶体管共射单级放大器 .....            | (150) |
| 实验三 两级放大电路 .....                | (156) |
| 实验四 负反馈放大电路 .....               | (159) |
| 实验五 射极输出器(共集电极电路) .....         | (162) |
| 实验六 场效应管放大电路 .....              | (164) |
| 实验七 差动放大电路 .....                | (166) |
| 实验八 RC 振荡电路 .....               | (168) |
| 实验九 集成运放的应用 .....               | (171) |
| 实验十 互补对称 OTL 功率放大电路 .....       | (185) |
| 实验十一 集成功率放大电路 .....             | (187) |
| 实验十二 整流滤波稳压电路 .....             | (189) |
| 实验十三 集成稳压电路 .....               | (191) |
| 实验十四 晶闸管可控整流电路 .....            | (194) |
| <b>第七章 数字电子技术实验部分</b> .....     | (198) |
| 一、数字电路实验基本知识 .....              | (198) |
| 二、基本实验 .....                    | (200) |

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 实验一 基本逻辑门逻辑实验                  | (200) |
| 实验二 TTL, HC 和 HCT 器件的参数测试      | (203) |
| 实验三 集电极开路门及三态门                 | (206) |
| 实验四 Multisim 初步使用              | (208) |
| 实验五 译码器及其应用研究                  | (210) |
| 实验六 数据选择器及其应用研究                | (212) |
| 实验七 组合逻辑中的冒险现象                 | (214) |
| 实验八 触发器及其应用                    | (215) |
| 实验九 时序逻辑电路                     | (217) |
| 实验十 计数器及其应用                    | (218) |
| 实验十一 555 定时器及其应用               | (220) |
| 实验十二 A/D 转换器实验                 | (222) |
| 实验十三 D/A 转换器实验                 | (224) |
| 三、综合性实验                        | (227) |
| 实验一 多路智力竞赛抢答器设计                | (227) |
| 实验二 数字钟电路设计                    | (229) |
| 附录 常用实验器件引线图                   | (232) |
| <b>第八章 电路分析实验部分</b>            | (235) |
| 实验一 示波器的使用                     | (235) |
| 实验二 基尔霍夫定律的验证                  | (237) |
| 实验三 叠加原理的验证                    | (238) |
| 实验四 戴维南定理的验证                   | (239) |
| 实验五 研究 $R, L, C$ 元件在正弦交流电路中的特性 | (241) |
| 实验六 一阶 $RC$ 电路的时域响应            | (243) |
| 实验七 日光灯的安装及功率因数的提高             | (245) |
| 实验八 串联谐振                       | (247) |
| 实验九 三相异步电动机的继电—接触控制            | (249) |
| <b>第九章 近代物理实验部分</b>            | (251) |
| 实验一 塞曼—法拉第效应                   | (251) |
| 实验二 光速的测定实验                    | (252) |
| 实验三 真空的获得与测量                   | (254) |
| 实验四 核磁共振                       | (255) |
| 实验五 夫兰克—赫兹实验                   | (258) |
| 实验六 真空镀膜与电子衍射                  | (260) |
| 实验七 全息照相实验                     | (261) |
| <b>第十章 高频电子线路实验部分</b>          | (264) |
| 实验一 $LC$ 调谐放大器(选频放大器)          | (264) |
| 实验二 $LC$ 电容反馈三点式振荡器(克拉泼振荡器)    | (266) |
| 实验三 石英晶体振荡器                    | (268) |

|             |                         |       |
|-------------|-------------------------|-------|
| 实验四         | 振幅调制器                   | (269) |
| 实验五         | 调幅波解调器                  | (272) |
| 实验六         | 变容二极管调频器                | (274) |
| <b>第十一章</b> | <b>微机原理实验部分</b>         | (277) |
| 实验一         | 用 DEBUG 验证程序段           | (277) |
| 实验二         | 汇编语言上机过程                | (278) |
| 实验三         | 简单程序设计                  | (280) |
| 实验四         | 循环程序设计——排序程序            | (281) |
| 实验五         | 8255 控制 LED 实验          | (282) |
| 实验六         | 8255 模拟交通灯实验            | (286) |
| 实验七         | 8253 定时/计数器实验           | (291) |
| 实验八         | D/A 转换实验                | (295) |
| <b>第十二章</b> | <b>信号与系统实验部分</b>        | (300) |
| 实验一         | 函数信号发生器                 | (300) |
| 实验二         | 交流毫伏表的使用                | (303) |
| 实验三         | 单片机低频信号发生器的使用           | (305) |
| 实验四         | 扫频源的使用                  | (307) |
| 实验五         | 频率计的使用                  | (309) |
| 实验六         | 有源和无源滤波器                | (310) |
| 实验七         | 方波的分解与合成                | (312) |
| 实验八         | 二阶网络函数的模拟               | (314) |
| 实验九         | 二阶网络状态轨迹的显示             | (317) |
| 实验十         | 抽样定理                    | (322) |
| <b>第十三章</b> | <b>通信原理实验部分</b>         | (325) |
| 实验一         | 数字基带信号的产生及波形变换实验        | (325) |
| 实验二         | HDB3 编译码实验              | (328) |
| 实验三         | 数字时分复用信号的分接实验           | (329) |
| 实验四         | 位同步信号提取实验               | (331) |
| 实验五         | 帧同步信号提取实验               | (332) |
| 实验六         | 幅度键控(2ASK)调制与解调实验       | (334) |
| 实验七         | 频率键控(2FSK)调制与解调实验       | (336) |
| 实验八         | 相位及差分相位键控调制与解调实验        | (338) |
| 实验九         | 循环码编解码实验                | (340) |
| 实验十         | 抽样定理及脉冲幅度调制与解调(PAM)实验   | (341) |
| 实验十一        | 脉冲编码调制与解调(PCM)实验        | (342) |
| 实验十二        | 增量调制( $\Delta M$ )编译码实验 | (344) |
| <b>第十四章</b> | <b>EDA 实验部分</b>         | (347) |
| 实验一         | 用原理图输入法设计一位全加器          | (347) |
| 实验二         | 用 VHDL 文本设计输入法设计基本组合电路  | (349) |

|             |                               |              |
|-------------|-------------------------------|--------------|
| 实验三         | 用 VHDL 文本设计输入法设计基本时序电路 .....  | (350)        |
| 实验四         | 含异步清零和同步时钟功能的加法计数器的设计 .....   | (351)        |
| 实验五         | 7 段数码显示译码器的设计 .....           | (351)        |
| 实验六         | 8 位数码扫描显示电路设计 .....           | (353)        |
| 实验七         | 数控分频器的设计 .....                | (354)        |
| 实验八         | 8 位 16 进制频率计的设计 .....         | (354)        |
| 实验九         | 用原理图输入法设计 8 位全加器 .....        | (355)        |
| 实验十         | 8 位十进制频率计的原理图设计 .....         | (356)        |
| 实验十一        | 用状态机实现序列检测器的电路设计 .....        | (357)        |
| 实验十二        | 用状态机实现 ADC0809 的采样控制电路 .....  | (358)        |
| 实验十三        | 乐曲硬件演奏电路设计 .....              | (358)        |
| 实验十四        | 乒乓球游戏电路设计 .....               | (359)        |
| 实验十五        | EDA 综合设计 .....                | (360)        |
| <b>第十五章</b> | <b>传感器实验部分 .....</b>          | <b>(362)</b> |
| 实验一         | 温度传感器及温度控制实验(AD590) .....     | (362)        |
| 实验二         | 电阻式传感器的单臂电桥性能实验 .....         | (364)        |
| 实验三         | 电阻式传感器的电子秤实验 .....            | (366)        |
| 实验四         | 接近式霍尔传感器实验 .....              | (366)        |
| 实验五         | 霍尔传感器的转速测量实验 .....            | (368)        |
| 实验六         | 压电加速度式传感器的特性实验 .....          | (368)        |
| 实验七         | 光纤传感器的位移特性实验 .....            | (369)        |
| 实验八         | 光电式传感器的转速测量实验 .....           | (371)        |
| 实验九         | 湿度式传感器的原理实验 .....             | (372)        |
| 实验十         | 超声波传感器的应用实验 .....             | (373)        |
| 附录一         | 计算机数据采集系统的使用说明 .....          | (373)        |
| 附录二         | 温度控制仪表操作说明 .....              | (374)        |
| 附录三         | JZY-Ⅲ型检测与转换技术实验箱(台)使用手册 ..... | (376)        |
| <b>第十六章</b> | <b>程控交换实验部分 .....</b>         | <b>(381)</b> |
| 实验一         | 人工交换实验 .....                  | (381)        |
| 实验二         | 空分交换(MT8816)实验 .....          | (382)        |
| 实验三         | 时分交换(MT8980)实验 .....          | (384)        |
| <b>第十七章</b> | <b>自动控制原理实验部分 .....</b>       | <b>(387)</b> |
| 实验一         | 典型环节的电模拟 .....                | (387)        |
| 实验二         | Matlab 初步 .....               | (391)        |
| 实验三         | LTI 系统的时域分析与根轨迹分析 .....       | (398)        |
| 实验四         | 线性系统的频域分析 .....               | (400)        |
| 实验五         | Simulink 仿真初步和系统串联校正 .....    | (403)        |
| <b>第十八章</b> | <b>电力电子技术实验部分 .....</b>       | <b>(410)</b> |
| 实验一         | 单相桥式全控整流电路仿真 .....            | (410)        |

|             |                       |              |
|-------------|-----------------------|--------------|
| 实验二         | 三相桥式全控整流电路·····       | (413)        |
| 实验三         | 直流斩波电路实验·····         | (415)        |
| 实验四         | 单相交流调压电路·····         | (416)        |
| 实验五         | 三相交流调压电路·····         | (418)        |
| <b>第十九章</b> | <b>单片机实验·····</b>     | <b>(421)</b> |
| 实验一         | 数据区传送子程序·····         | (421)        |
| 实验二         | 无符号双字节快速乘法子程序·····    | (423)        |
| 实验三         | 工业顺序控制·····           | (425)        |
| 实验四         | P3.3 口输入,P1 口输出 ····· | (428)        |
| 实验五         | 电脑时钟·····             | (430)        |
| 实验六         | 8255 控制交通灯 ·····      | (434)        |
| 实验七         | D/A 转换 ·····          | (437)        |

# 第一章 实验误差理论基础

物理实验是研究自然现象、总结物理规律的基本方法，同时也是验证新理论的必经之路。物理实验大体分为下面几个步骤：①要明确实验目的、内容、步骤，通过实验过程观察某物理现象，测量某物理量。②观察和测量，测试计量是取得正确实验结果的关键一步，对测量量准确记录计量结果。③任何测量都有误差，应运用误差理论估计判断测量结果是否可靠，对计量结果误差分析和计算。④实验目的是为了从测得的大量数据中得到实验规律，寻找各变量间的相互关系，数据处理。⑤最后写出测量结果——结果表达。

主要内容：①基本概念——物理实验和测量误差。②误差分类——偶然误差和系统误差。③误差计算——测量结果的不确定度。④数据格式——有效数字。⑤数据处理——用最小二乘法作直线拟合。

## [物理实验和测量误差]

测量就是将待测量与作标准单位的物理量进行比较，得到物理量的测量值。

测量值必须包括数值和单位，如测量课桌的长度为 1.2534m。

测量的分类：

1. 按测量方式通常可分为直接测量和间接测量

直接测量——由仪器直接读出测量结果的叫做直接测量。

如：用米尺测量课桌的长度，电压表测量电压等。

间接测量——由直接测量结果经过公式计算才能得出结果的叫做间接测量。

如：测量单摆的振动周期  $T$ ，用公式  $T=2\pi\sqrt{l/g}$ ，求得  $g$ 。

2. 按测量精度通常可分为

(1)等精度测量——对某一物理量进行多次重复测量，而且每次测量的条件都相同（同一测量者，同一组仪器，同一种实验方法，温度和湿度等环境也相同）。

(2)不等精度测量——在诸测量条件中，只要有一个发生了变化，所进行的测量。

(3)由于测量方法、测量环境、测量仪器和测量者的局限性导致误差的不可避免性，待测物理量的真值同测量值之间总会存在某种差异，这种差异就称为测量误差，定义为：测量误差( $\delta$ )= 测量值( $X$ )—真值( $a$ )。

(4)测量结果也应包含测量误差的说明及其优劣的评价，如  $Y=N\pm\Delta N$ 。

真值就是与给定的特定量的定义相一致的量值。客观存在的、但不可测得的(测量的

不完善造成)。可知的真值:①理论真值:理论设计值、理论公式表达值等,如三角形内角和为  $180^\circ$ 。②约定(实用)真值:指定值、最佳值等,如阿伏加德罗常数、算术平均值当真值等。

### [偶然误差和系统误差]

按其性质和原因可分为三类:系统误差、偶然误差(随机误差)、粗大误差。

#### 1. 系统误差

在重复测量条件下对同一被测量进行无限多次测量结果的平均值减去真值:  
 $\bar{x}(n \rightarrow \infty) - a$ 。

来源:仪器、装置误差;标准器误差;仪器安装调整不妥、不水平、不垂直、偏心、零点不准等;如天平不等臂、分光计读数装置的偏心;附件如导线。

测量环境误差:温度、湿度、光照,电磁场等。

测量理论或方法误差:理论公式为实验条件达不到理论公式所规定的要求。

人员误差:生理或心理特点所造成的误差。

特点:同一被测量多次测量中,保持恒定或以可预知的方式变化(一经查明就应设法消除其影响)。

分类:定值系统误差——其大小和符号恒定不变。

例如,千分尺没有零点修正,天平砝码的标称值不准确等。

(1)变值系统误差——呈现规律性变化。可能随时间,随位置变化。例如分光计刻度盘中心与望远镜转轴中心不重合,存在偏心差。发现的方法:①数据分析法:观察  $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$  随测量次序变化。②理论分析法:理论公式和仪器要求的使用条件。③对比法。

(2)实验方法:单摆  $g = (9.800 \pm 0.002) \text{ m/s}^2$ ;自由落体  $g = (9.77 \pm 0.02) \text{ m/s}^2$ 。其一存在系统误差。

(3)仪器:如两个电表接入同一电路,对比两个表的读数,如其一是标准表,可得另一表的修正值。

(4)改变测量条件:某些物理量的方向、参数的数值、甚至换人等。

误差原因及措施:任何实验仪器、理论模型、实验条件,都不可能理想。

(1)消除产生系统误差的根源(原因)。

(2)选择适当的测量方法。

①交换法——如为了消除天平不等臂而产生的系统误差。②替代法——如用自组电桥测量电阻时。③抵消法——如测量杨氏模量实验中,取增重和减重时读数的平均值。④半周期法——如分光计的读数盘相对  $180^\circ$  设置两个游标,任一位置用两个游标读数的平均值。

各种消减系统误差的方法都具有较强的针对性,都是经验型、具体的处理方法。

#### 2. 偶然误差(随机误差)

测量结果减去同一条件下对被测量进行无限多次测量结果的平均值  $x_i - \bar{x}(n \rightarrow \infty)$ 。

定义:在相同的条件下,由于偶然的不确定的因素造成每一次测量值的无规则的涨落,测量值对真值的偏离时大时小、时正时负,这类误差称为偶然误差。

来源:仪器性能和测量者感官分辨力的统计涨落,环境条件的微小波动,测量对象本身的不确定性(如气压小球直径或金属丝直径等)等。

特点:个体而言是不确定的;但其总体服从一定的统计规律。测量列如表 1-1。

处理:可以用统计方法估算其对测量结果的影响(标准差),不可修正,但可减小之。测量结果分布规律的估计——经验分布曲线  $[f(v_i)-v_i]$ ,如图 1-1、图 1-2、图 1-3 所示。

表 1-1 测量列  $x_i$ ,  $n$  容量  $\delta_i = x_i - a$   $f(\delta_i) - \delta_i$  出现的概率

| $\delta_i$ (单位) | -0.2 | -0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.2 |
|-----------------|------|------|-----|-----|-----|
| 出现次数            | 10   | 20   | 40  | 20  | 10  |
| $f(\delta_i)$   | 0.1  | 0.2  | 0.4 | 0.2 | 0.1 |

对大量数据处理时,往往对  $\delta_i$  取一个单位  $\Delta\delta$  (尽量小),考虑  $\delta_i$  落在第一个  $\Delta\delta$ , 第二个  $\Delta\delta$ , 第三个  $\Delta\delta$ ……的  $f(\delta_i)$  经验分布曲线。

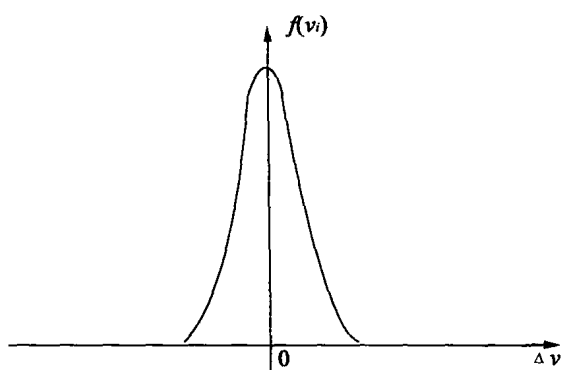


图 1-1 正态分布

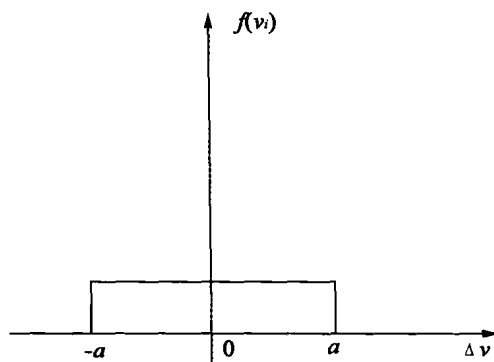


图 1-2 均匀分布

正态分布规律:如图 1-4 所示,大多数偶然误差服从正态分布(高斯分布)规律。

特点:①有界性。②单峰性。③对称性。④抵偿性。

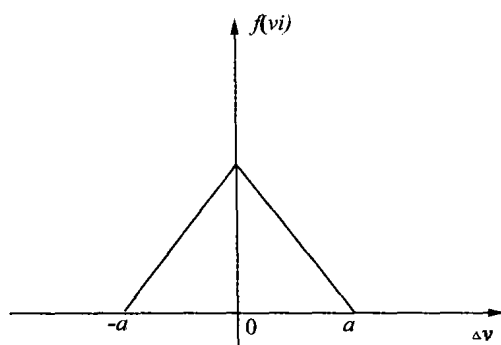


图 1-3 三角分布

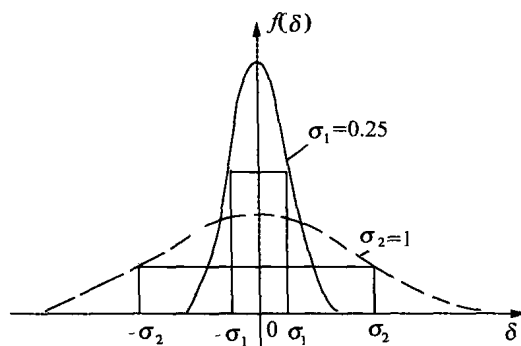


图 1-4 正态分布

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0 \quad f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$$

可以通过多次测量,利用其统计规律达到互相抵偿随机误差,找到真值的最佳近似值(又叫最佳估计值或最近真值)。

### 3. 粗大误差

明显超出规定条件下预期的误差。

来源:使用仪器的方法不正确,粗心大意读错、记错、算错数据或实验条件突变等原因造成的(坏值)。

处理:实验测量中要尽力避免过失错误;在数据处理中要尽量剔除坏值。

实验中的异常值决不能不加分析地统统扔掉——很多惊世发现都是超出预期的结果!

精确度:用于表述测量结果的好坏。

(1)精密度:表示测量结果中随机误差大小的程度,  $x_i - \bar{x}$ 。

即是指在规定条件下对被测量进行多次测量时,所得结果之间符合的程度,简称为精度。

(2)正确度:表示测量结果中系统误差大小的程度。

它反映了在规定条件下,测量结果中所有系统误差的综合,  $\bar{x} - a$ 。

(3)准确度:表示测量结果与被测量的“真值”之间的一致程度。

它反映了测量结果中系统误差与随机误差的综合,又称精确度。

三者的关系如图 1-5 所示。

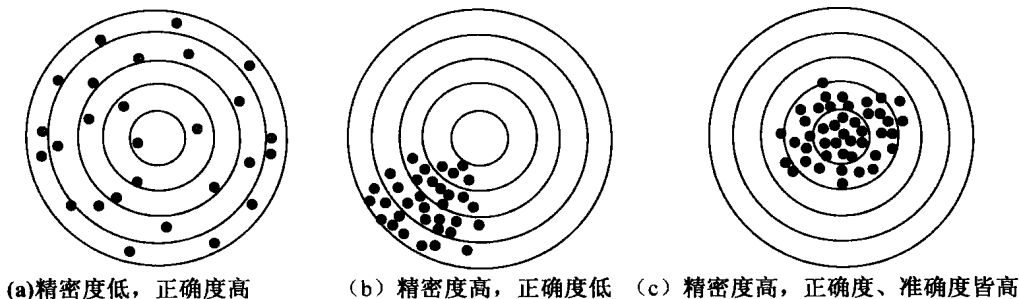


图 1-5 精密度和正确度关系

## [测量结果的不确定度]

### 1. 什么是不确定度

测量结果写成如下形式:  $y = N \pm \Delta N$ , 其中  $y$  代表待测物理量,  $N$  为该物理量的测量值,  $\Delta N$  是一个恒正的量, 称为不确定度, 代表测量值  $N$  不确定的程度, 也是对测量误差的可能取值的测度, 是对待测真值可能存在的范围的估计。

不确定度和误差是两个不同的概念: 误差是指测量值与真值之差, 一般情况下, 由于真值未知, 所以它是未知的。不确定度的大小可以按一定的方法计算(或估计)出来。

### 2. 测量结果的含义

式  $y = N \pm \Delta N$  的含义是：待测物理量的真值有一定的概率落在上述范围内，或者说，上述范围以一定的概率包含真值。这里所说的“一定的概率”称为置信概率，而区间  $[N - \Delta N, N + \Delta N]$  则称为置信区间。

在一定的测量条件下，置信概率与置信区间之间存在单一的对应关系，置信区间越大，置信概率越高；置信区间越小，置信概率越低。如果置信概率为 100%，其对应的  $\Delta N$  就称为极限不确定度，用  $e$  表示，这时式  $y = N \pm \Delta N$  写做  $Y = N \pm e$  表示真值一定在  $[N - e, N + e]$  中。

相对不确定度：为了比较两个以上测量结果精确度的高低，常常使用相对不确定度这一概念，其定义为相对不确定度 = 不确定度 / 测量值，即  $\Delta N / N$ 。

用米尺分别测量课桌长度 ( $L = 1210.5 \text{ mm}$ ) 和钢笔直径 ( $d = 10.1 \text{ mm}$ )，它们的测量极限不确定度均为  $e = 1 \text{ mm}$ ，比较以上两个测量结果精确度的高低。

### 3. 不确定度的估计方法

#### (1) 直接测量中不确定度的估算

(a) 多次测量：在相同条件下对一物理量  $X$  进行了  $n$  次独立的直接测量，所得  $n$  个测量值为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，称其为测量列，标准不确定度参数：数学期望（算术平均值）和标准差。

$$\text{算术平均值: } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\text{测量列标准不确定度(标准差): } \sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - a)^2}$$

任一测量结果的误差落在  $[-\sigma_x, \sigma_x]$  范围内的概率为 68.3%。

$$\text{算术平均值的标准不确定度, 平均值的标准差: } \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

算术平均值的误差落在  $[-\sigma_x, \sigma_x]$  范围内的概率为 68.3%。

随  $n$  的增大而减小，但当  $n$  大于 10 后，减小速度明显降低，通常取  $5 \leq n \leq 10$ 。

(b) 单次测量结果标准不确定度的估算： $\sigma = \frac{e}{k}$

$$\text{测量结果的表示: } \begin{cases} x = \bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}} & (\text{单位}) \\ E = \frac{\sigma_{\bar{x}}}{\bar{x}} & (100\%) \end{cases}$$

意义：真值  $a$  落在  $[-\sigma_x, \sigma_x]$  范围内的概率为 68.3%。

**例 1** 用温度计对某个不变温度等精度测量数据如表 1-2，求测量结果。

表 1-2

测量数据

| $i$                   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $t(^{\circ}\text{C})$ | 528 | 531 | 529 | 527 | 531 | 533 | 529 | 530 | 532 | 530 | 531 |

解：

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$$

$$= 530.0909^\circ\text{C} = 530.1^\circ\text{C}$$

$$\begin{cases} t = \bar{t} \pm \sigma_i & (\text{单位}) \\ E = \frac{\sigma_i}{\bar{t}} & (100\%) \end{cases}$$

$$\sigma_i = \frac{\sigma_i}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} = 0.5301^\circ\text{C} = 0.6^\circ\text{C}$$

$$E = \frac{\sigma_i}{\bar{t}} \times 100\% = \frac{0.5301}{530.0909} \times 100\% = 0.1000017\% = 0.11\%$$

$$\begin{cases} t = 530.1 \pm 0.6 & (^\circ\text{C}) \\ E = 0.11 & (\%) \end{cases}$$

(2) 间接测量结果不确定度的估计

设间接测量  $N = f(x, y, z, \dots)$

量值:  $\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots)$

$$\text{标准不确定度: } \sigma_N = \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots}$$

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

$$\text{相对不确定度: } E = \frac{\sigma_N}{\bar{N}} = \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)^2 \left(\frac{\sigma_x}{\bar{N}}\right)^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right)^2 \left(\frac{\sigma_y}{\bar{N}}\right)^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial z}\right)^2 \left(\frac{\sigma_z}{\bar{N}}\right)^2 + \dots}$$

$$\text{测量结果的表示: } \begin{cases} N = \bar{N} \pm \sigma_N & (\text{单位}) \\ E = \frac{\sigma_N}{\bar{N}} \times 100\% \end{cases}$$

计算顺序: 计算公式以加减运算为主, 先算标准不确定度, 再算相对不确定度; 计算公式以乘除或乘方运算为主, 先算相对不确定度, 再算标准不确定度。

不确定度常用公式:

函数表达式:  $N = x \pm y$       $N = xy$  或  $N = x/y$

$N = kx$  ( $k$  为常数)      $N = xk$  ( $k$  为常数)

$$\text{方均根合成方式: } \sigma_N = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad \frac{\sigma_N}{|N|} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2}$$

$$\sigma_N = |k| \sigma_x \quad \frac{\sigma_N}{|N|} = |k| \frac{\sigma_x}{|x|}$$

$$\text{算数合成方式: } e_N = e_x + e_y \quad \frac{e_N}{|N|} = \frac{e_x}{|x|} + \frac{e_y}{|y|}$$

$$e_N = |k| e_x \quad \frac{e_N}{|N|} = |k| \frac{e_x}{|x|}$$

例 2 测某立方体钢材的长、宽、高为  $l, b, h$  (如表 1-3), 材料的密度  $\rho = 7.86 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 求