

教育部世行贷款21世纪初高等教育教学改革项目研究成果



高等学校教材

# 化工原理实验

杨祖荣 主编



化学工业出版社

教材出版中心

教育部世行贷款 21 世纪初高等教育教学改革项目研究成果  
高等学校教材

# 化工原理实验

杨祖荣 主编



化学工业出版社  
教材出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

**图书在版编目 (CIP) 数据**

化工原理实验/杨祖荣主编. —北京: 化学工业出版社,  
2004.3  
(教育部世行贷款 21 世纪初高等教育教学改革项目研究  
成果)  
高等学校教材  
ISBN 7-5025-5418-1

I. 化… II. 杨… III. 化工原理-实验-高等学校-教  
材 IV. TQ02-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 025405 号

---

教育部世行贷款 21 世纪初高等教育教学改革项目研究成果  
高等学校教材

**化 工 原 理 实 验**

杨祖荣 主编

责任编辑: 杨 菁

文字编辑: 贾 婷

责任校对: 顾淑云 宋 玮

封面设计: 蒋艳君

\*

化学工业出版社 出版发行  
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

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

\*

新华书店北京发行所经销

北京管庄永胜印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 9¼ 字数 205 千字

2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5418-1/G·1413

定 价: 16.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

本书是教育部教学改革工程世行贷款 21 世纪初高等教育教学改革项目《化工类专业创新人才培养模式、教学内容、教学方法和教学改革的研究与实施》的研究成果之一。

本书以化工单元操作实验研究中常用的基础实验技术为主要内容，结合工程实际编写而成。全文包括实验数据的测量及误差分析、实验数据处理与实验设计方法、化工实验室常用仪表及控制技术、化工原理实验及演示实验、计算机数据处理及实验仿真、实验室常用仪器仪表等。

随着科学技术和教学改革的深入发展，学科与学科之间、课程与课程之间的相互渗透，推动了各学科与课程的发展和改革。因此，我们认为，化工原理实验在完成化工基本训练外，适当引进计算机过程模拟和测控技术，对改革本课程内容和拓宽学生知识面，以适应社会发展和 21 世纪人才的培养是必要的。我们已对流体阻力、离心泵性能、板框及动态过滤、传热、精馏、吸收-解吸和流化床干燥七种单元实验装置进行改进，以摸索经验，并介绍给读者。

本书由杨祖荣主编，参加教材编写的同志还有曹仲义、陈旭东、黄海、王宇、赵东等。本书承蒙清华大学雷良恒教授主审，并提出许多宝贵意见。在编写过程中，编者的同事给予了热情的支持和帮助，在此向他们表示深切的谢意。

本书由于编写时间仓促，再加上作者的学识和经验有限，不妥之处，衷心希望读者指正。

编 者

2003 年 8 月

# 目 录

绪 论 .....	1
一、化工原理实验的目的 .....	1
二、化工原理实验的注意事项 .....	1
三、实验室规则 .....	2
<b>第一章 实验数据的测量及误差分析 .....</b>	<b>3</b>
第一节 实验数据的测量 .....	3
一、有效数据的读取 .....	3
二、有效数字的计算规则 .....	4
第二节 实验数据的测量值及其误差 .....	5
一、真值 .....	5
二、误差的表示方法 .....	5
三、误差的分类 .....	6
四、准确度、精密度和正确度 .....	7
第三节 随机误差的正态分布 .....	8
一、随机误差的正态分布 .....	8
二、概率密度分布函数 .....	9
三、随机误差的表达方法 .....	9
第四节 可疑值的判断与删除 .....	10
一、拉依达准则 .....	10
二、肖维勒准则 .....	11
三、格拉布斯准则 .....	12
第五节 最可信赖值的求取 .....	15
一、常用的平均值 .....	15
二、最小二乘法原理与算术平均值的意义 .....	15
<b>第二章 实验数据的处理与实验设计方法 .....</b>	<b>17</b>
第一节 实验数据的整理方法 .....	17
一、列表法 .....	17
二、图示法 .....	18
三、方程表示法 .....	19

第二节 实验数据的处理方法 .....	21
一、数据回归方法 .....	21
二、数值计算方法 .....	27
第三节 正交实验设计 .....	29
一、正交实验设计 .....	30
二、正交表头设计 .....	31
三、正交实验设计的分析方法 .....	32
重要符号表 .....	36
<b>第三章 化工实验常用参数的测控技术 .....</b>	<b>38</b>
第一节 温度测量及控制 .....	38
一、热膨胀式温度计 .....	38
二、热电偶温度计 .....	39
三、热电阻温度计 .....	42
四、温度控制技术 .....	43
第二节 压力、压差测量及控制 .....	44
一、常用检测元件及原理 .....	44
二、压力的控制技术 .....	47
第三节 流量测量 .....	49
一、差压式流量计 .....	49
二、转子流量计 .....	49
三、涡轮流量计 .....	49
四、质量流量计 .....	50
五、流量控制技术 .....	50
第四节 功率测量 .....	51
一、单相功率 .....	51
二、三相功率 .....	51
三、功率信号的电测方法 .....	51
四、泵轴功率的测量 .....	51
第五节 化工单元实验装置测控图例 .....	52
一、流体阻力实验 .....	52
二、离心泵特性曲线实验 .....	53
三、流体阻力、离心泵联合实验 .....	54
四、板框及动态过滤实验 .....	55
五、传热实验 .....	56
六、氧解吸实验 .....	57
七、精馏实验 .....	58
八、干燥实验 .....	59
<b>第四章 化工原理实验及演示实验 .....</b>	<b>60</b>

实验一	流体流动阻力的测定 .....	60
实验二	离心泵性能实验 .....	63
实验三	板框及动态过滤实验 .....	67
实验四	传热膜系数测定实验 .....	72
实验五	精馏实验 .....	75
实验六	氧解吸实验 .....	79
实验七	流化床干燥实验 .....	84
实验八	雷诺演示实验 .....	89
实验九	流体机械能转换演示实验 .....	91
实验十	温度、流量、压力校正实验 .....	92
	重要符号表 .....	96
<b>第五章</b>	<b>计算机数据处理及实验仿真 .....</b>	<b>98</b>
第一节	计算机数据处理 .....	98
一、	用 EXCEL 完成实验数据处理 .....	98
二、	使用 MATLAB 完成实验数据处理 .....	102
第二节	实验仿真 .....	104
一、	仿真简介 .....	104
二、	化工原理仿真实验软件 .....	105
<b>第六章</b>	<b>化工原理实验室的常用仪器 .....</b>	<b>109</b>
第一节	人工智能调节器 .....	109
一、	面板说明 .....	109
二、	基本使用操作 .....	109
三、	AI 人工智能调节及自整定 (AT) 操作 .....	110
四、	功能及设置 .....	111
五、	使用举例 .....	112
第二节	阿贝折光仪 .....	112
一、	工作原理与结构 .....	112
二、	使用方法 .....	113
三、	注意事项 .....	114
第三节	溶氧仪 .....	114
一、	基本结构 .....	114
二、	使用方法 .....	115
三、	注意事项 .....	115
第四节	水分快速测定仪 .....	115
一、	原理与结构 .....	115
二、	使用与校验 .....	116
三、	注意事项 .....	117
第五节	FLUKE-45 双显多用表 .....	117

一、面板说明	118
二、操作指南	118
三、注意事项	119
第六节 变频器	119
一、面板说明	119
二、操作步骤	119
三、注意事项	120
四、操作示范	120
附录	121
附录一 常用数据表	121
附录二 正交表	130
附录三 $F$ 分布数值表	133
附录四 实验常见故障	136
参考文献	138



# 绪 论

## 一、化工原理实验的目的

化工原理是紧密联系化工生产实际，实践性很强的一门基础技术课程。化工原理实验则是学习、掌握和运用这门课程必不可少的重要环节，它与理论教学、习题课和课程设计等教学环节构成一个有机的整体。化工原理实验与一般化学实验不同之处在于其具有明显的工程特点，有些实验具有工程或中间试验规模，所得到的结论，对于化工单元操作设备的设计，具有重要的指导意义。因此，通过实验，应达到如下目的：

- ① 验证化工单元过程的基本理论，并在运用理论分析实验的过程中，使理论知识得到进一步的理解和巩固；
- ② 熟悉实验装置的流程、结构，以及化工中常用仪表的使用方法；
- ③ 掌握化工原理实验的方法和技巧，例如，实验装置的流程、操作条件的确定、测控元件及仪表的选择、过程控制和准确数据的获得，以及实验操作分析、故障处理等；
- ④ 增强工程观点，培养科学实验能力，如培养学生进行实验设计，组织实验，并从中获得可靠的结论，提供基础数据，提高化学工程设计的初步能力；
- ⑤ 提高计算与分析问题的能力，运用计算机及软件处理实验数据，以数学方式或图表科学地表达实验结果，并进行必要的分析讨论，编写完整的实验报告。

## 二、化工原理实验的注意事项

① 实验前，必须认真预习教材中的有关理论，正确理解实验目的及要求，详细了解实验流程、装置及主要设备的结构、测控元件及仪器仪表的使用方法，准确掌握实验操作步骤、数据测量和整理的方法。为保证实验能够顺利进行，要对所测数据及其变化趋势，力求做到心中有数，并预先做出原始数据记录表格，对实验的预期结果、可能发生的故障及排除做出合理的判断。实验由3~4人组成一个小组，实验小组成员共同进行同一实验项目，要求每组同学在实验前认真讨论实验方案，做到分工明确、动作协调。

② 实验过程中，应当全神贯注地进行操作，如实地按照仪表显示的数据进行记录，同时，要细心观察，注意发现问题。对于实验中发生的各种现象要加以分析，对测得的数据要考虑它们是否合理，若实验过程中出现数据重复性差，甚至反常现象，务必找出原因加以解决，做出合理的解释，必要的返工是需要的，任何草率、不负责任的工作态度是决不允许的。

③ 实验完成后，应认真完成实验报告的整理工作。写出报告是整个实验的最后一个环节，也是学生进行综合训练的重要环节，实验报告中，学生应将测得的数据、观察到的

现象、计算结果和分析结论等用科学的语言表达出来。实验报告必须书写工整，图表清晰规范，结论明确，分析中肯，能提出自己的见解，培养探索能力和创造能力。报告应包括以下各项内容：

报告题目；实验时间，报告人，同组人；实验目的及任务；所依据的基本理论；实验装置示意流程图及主要测试仪器仪表；实验操作要点；实验数据的整理、计算示例；实验结果及结论的归纳与总结；分析讨论；参考文献；对部分专业学生，要求写报告摘要，并列到报告之首。

### 三、实验室规则

① 准时进实验室，不得迟到，不得无故缺课。

② 遵守纪律，严肃认真地进行实验，室内不准吸烟，不准大声谈笑歌唱，不得穿拖鞋进入实验室，不要进行与实验无关的活动。

③ 在没有搞清楚仪器设备的使用方法前，不得运转。在实验时要得到教师许可后方可开始操作，与实验无关的仪器设备，不得乱摸乱动。

④ 爱护仪器设备，节约水、电、气及药品，开闭阀门不要用力过大，以免损坏。仪器设备如有损坏，立即报告指导教师，并于下课前填写破损报告单，由指导教师审核上报处理。

⑤ 保持实验室及设备的整洁，实验完毕后将仪器设备恢复原状并做好现场清理工作，衣服应放在固定地点，不得挂在设备上。

⑥ 注意安全及防火，开动电机前，应观察电动机及其运动部件附近是否有人在工作，合电闸时，应慎防触电，并注意电机有无异常声音。精馏塔附近不准使用明火。

# 第一章 实验数据的测量及误差分析

科学研究是以实验工作为基础，在实验中需测定大量的实验数据，并对其进行分析、计算，再整理成图表、公式或经验模型。为保证实验结果的可靠性与精确性，就要正确地测取、处理和分析这些数据，同时应了解、掌握实验过程中误差产生的原因和规律，并用科学的实验方法，尽可能地减小误差。

## 第一节 实验数据的测量

### 一、有效数据的读取

#### 1. 实验数据的分类

在化工实验过程中，经常会遇到以下两类数字。

##### (1) 无量纲数据

这一类数据均没有量纲，例如：圆周率 ( $\pi$ )、自然对数 ( $e$ )，以及一些经验公式的常数、指数值。对于这一类数据的有效数字，其位数在选取时可多可少，通常依据实际需要而定。

##### (2) 有量纲的数据

用来表示测量的结果。在实验过程中，所测量的数据大多是这一类，例如：温度 ( $T$ )、压强 ( $p$ ) 和流量 ( $Q$ ) 等。这一类数据的特点是除了具有特定的单位外，其最后一位数字通常是由测量仪器的精确度决定的估计数字。就这类数据测量的难易程度和采用的测量方法而言，一般可利用直接测量和间接测量两种方法进行测量。

#### 2. 直接测量时有效数字的读取

直接测量是实现物理量测量的基础，在实验过程中应用十分广泛，例如：用温度计测量温度、用压差计测量压力（压差）和用秒表测量时间等。直接测量值的有效数字的位数取决于测量仪器的精确度。测量时，一般有效数据的位数可保留到测量仪器最小刻度的后一位，这最后一位即为估计数字。例如（见图 1-1）使用精确度为 0.1cm 的刻度尺测量长度时，其数据可记为 22.26cm，其有效数字为 4 位，最后一位为估计数字，其大小可随实验者的读取习惯不同而略有差异。

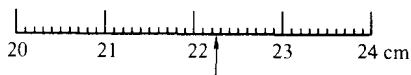


图 1-1 刻度尺示数的读取

若测量仪器的最小刻度不以  $1 \times 10^n$  为单位 (见图 1-2), 则估计数字为测量仪器的最小刻度位即可。

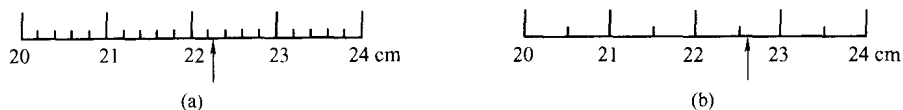


图 1-2 最小刻度不同的刻度尺示数的读取

其数据可记为:

图 1-2 (a) 22.3cm, 有效数字为 3 位;

图 1-2 (b) 22.7cm, 有效数字为 3 位。

### 3. 间接测量时有效数字的选取

实验过程中, 有些物理量难于直接测量时, 可选用间接测量法, 例如: 测量水箱内流体的质量, 可通过测量水箱内水的体积计算得到; 测量管内流体的流速, 可通过测量流体的体积流量及圆管的直径计算得到。通过间接测量得到的有效数字的位数与其相关的直接测量的有效数字有关, 其取舍方法服从有效数字的计算规则。

## 二、有效数字的计算规则

### 1. “0” 在有效数字中的作用

测量的精度是通过有效数字的位数表示的, 有效数字的位数应是除定位用的“0”以外的其余数位, 但用来指示小数点位数或定位的“0”则不是有效数字。

对于“0”, 必须注意, 50g 不一定是 50.00g, 它们的有效数字位数不同, 前者为 2 位, 后者为 4 位, 而 0.050g 虽然为 4 位数字, 但有效数字仅为 2 位。

在科学研究与工程计算中, 为了清楚地表示出数据的精度与准确度, 可采用科学记数法表示。其方法为: 先将有效数字写出, 并在第一个有效数字后面加上小数点, 并用 10 的整数幂表示数值的数量级。例如: 981000 的有效数字为 4 位, 可以写成  $9.810 \times 10^5$ , 若其只有 3 位有效数字可以写成  $9.81 \times 10^5$ 。

### 2. 有效数字的舍入规则

在数字计算过程中, 确定有效数字位数, 舍去其余数位的方法通常是将末尾有效数字后边的第一位数字采用四舍五入的计算规则。若在一些精度要求较高的场合, 则采用如下方法。

① 末尾有效数字后的第一位数字若小于 5, 则舍去。

② 末尾有效数字后的第一位数字若大于 5, 则将末尾有效数字加上 1。

③ 末尾有效数字后的第一位数字若等于 5, 则由末尾有效数字的奇偶而定, 当其为偶数或 0 时, 不变; 当其为奇数时, 则加上 1 (变为偶数或 0)。

如对下面几个数保留 3 位有效数字, 则

$$25.44 \longrightarrow 25.4$$

$$25.45 \longrightarrow 25.4$$

$$25.47 \longrightarrow 25.5$$

$$25.55 \longrightarrow 25.6$$

### 3. 有效数字的运算规则

在数据计算过程中, 一般所得数据的位数很多, 已超过有效数字的位数, 这样就需将多余的位数舍去, 其运算规则如下。

① 在加减运算中，各数所保留的小数点后的位数，与各数中小数点后的位数最少的相一致。例如：将 13.65，0.0082，1.632 三个数相加，应写为

$$13.65+0.01+1.63=15.29$$

② 在乘除运算中，各数所保留的位数，以原来各数中有效数字位数最少的那个数为准，所得结果的有效数字位数，亦应与原来各数中有效数字位数最少的那个数相同。例如：将 0.0121，25.64，1.05782 三个数相乘，应写为

$$0.0121\times 25.6\times 1.06=0.328$$

③ 在对数计算中，所取对数位数与真数有效数字位数相同。

$$\lg 55.0=1.74$$

$$\ln 55.0=4.01$$

## 第二节 实验数据的测量值及其误差

在实验测量过程中，由于测量仪器的精密程度，测量方法的可靠性，以及测量环境、人员等多方面的因素，使测量值与真值间不可避免地存在着一些差异，这种差异称为误差，误差普遍存在于测量过程中。通过本节的学习，可了解误差存在的原因及减小实验误差的方法。

### 一、真值

真值也叫理论值或定义值，是指某物理量客观存在的实际值。由于误差存在的普遍性，通常真值是无法测量的。在实验误差分析过程中，我们常通过如下方法来选取真值。

#### 1. 理论真值

这一类真值是通过理论证实而知的值。例如：平面三角形的内角和为  $180^\circ$ ；某一量与其自身之差为 0，与其自身之比为 1；以及一些理论设计值和理论公式表达值等。

#### 2. 相对真值

在某些过程中（如化工过程），常使用高精度级标准仪器的测量值代替普通测量仪器的测量值的真值，称为相对真值。例如：用高精度铂电阻温度计测量的温度值相对于普通温度计指示的温度值而言是真值；用标准气柜测量得到的流量值相对于转子流量计及孔板流量计指示的流量而言是真值。

#### 3. 近似真值

若在实验过程中，测量的次数无限多，根据误差分布规律可知，正负误差出现的几率相等，故将各个测量值相加，并加以平均，在无系统误差的情况下，可能获得近似于真值的数值。所以近似真值是指观测次数无限多时，求得的平均值。

然而，由于观测的次数有限，因此用有限的观测次数求出的平均值，只能近似于真值，并称此最佳值为平均值。

### 二、误差的表示方法

#### 1. 绝对误差

某物理量经测量后，测量值 ( $x$ ) 与该物理量真值 ( $\mu$ ) 之间的差异，称为绝对误差，记为  $\delta$ ，简称误差。

绝对误差=测量值-真值

$$\text{即} \quad \delta = x - \mu \quad (1-1)$$

在工程计算中,真值常用算术平均值( $\bar{x}$ )或相对真值代替,则式(1-1)可写为

绝对误差=测量值-精确测量值=测量值-算术平均值

$$\text{即} \quad \delta = x - \bar{x} \quad (1-2)$$

## 2. 相对误差

绝对误差与真值的比值,称为相对误差,即

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}}$$

相对误差可以清楚地反映出测量的准确程度,如式(1-3)所示。

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量值} - \text{绝对误差}} = \frac{1}{\text{测量值}/\text{绝对误差} - 1} \quad (1-3)$$

当绝对误差很小时,测量值/绝对误差 $\gg 1$ ,则有

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量值}} \quad (1-4)$$

绝对误差是一个有量纲的值,相对误差是无量纲的真分数。通常,除了某些理论分析外,用测量值计算相对误差较为适宜。

## 3. 引用误差

为了计算和划分仪器准确度等级,规定一律取该量程中的最大刻度值(满刻度值)作为分母,来表示相对误差,称为引用误差。

$$\text{引用误差} = \frac{\text{示值误差}}{\text{满刻度值}} \quad (1-5)$$

式中,示值误差为仪表某指示值与其真值(或相对真值)之差。

仪表精度等级(S)(最大引用误差)为

$$S = \frac{\text{最大示值误差}}{\text{最大刻度值}} \quad (1-6)$$

测量仪表的精度等级是国家统一规定的,按引用误差的大小分成几个等级,将引用误差的百分数去掉,剩下的数值就称为测量仪表的精度等级。例如:某台压力计最大引用误差为1.5%,则其精度等级为1.5级,可用1.5表示,通常简称为1.5级仪表。电工仪表的精度等级分别为0.1,0.2,0.5,1.0,1.5,2.5和5.0七个等级。

## 三、误差的分类

根据误差产生的原因及其性质,可将误差分为系统误差、随机误差和过失误差三类。

### 1. 系统误差

系统误差是指在一定条件下,对同一物理量进行多次测量时,误差的数字保持恒定,或按照某种已知函数规律变化。在误差理论中,系统误差表明一个测量结果偏离真值或实际值的程度。系统误差的大小可用正确度来表征,系统误差越小,正确度越高;系统误差越大,正确度越低。

系统误差产生的原因通常有以下几点。

- ① 测量仪器：仪器的精度不能满足要求或仪器存在零点偏差等。
- ② 测量方法：以近似的测量方法测量或利用简化的计算公式进行计算。
- ③ 环境及人为因素：指温度、湿度和压力等外界因素以及测量人员的习惯，对测量过程引起的误差。

系统误差是误差的重要组成部分，在测量时，应尽力消除其影响，对于难于消除的系统误差，应设法确定或估计其大小，以提高测量的正确度。

### 2. 偶然误差

偶然误差（随机误差）是一种随机变量，因而在一定条件下服从统计规律。它的产生取决于测量中一系列随机性因数的影响。为了使测量结果仅反映随机误差的影响，测量过程中应尽可能保持各影响量以及测量仪表、方法和人员不变，即保持等精度测量的条件。随机误差表现了测量结果的分散性。在误差理论中，常用精密度一词表征随机误差的大小。随机误差越小，精密度越高。

### 3. 过失误差

过失误差（粗差）是由于测量过程中明显歪曲测量结果的误差。如测错（测量时对错标记等），读错（如将6读成8），记错等都会带来过失误差。它产生的原因主要是粗枝大叶、过度疲劳或操作不正确。含有过失误差的测量值被称为坏值，正确的实验结果不应该含有过失误差，即所有的坏值都要剔除，坏值的剔除方法将在本章第四节详细介绍。

## 四、准确度、精密度和正确度

### 1. 准确度（又称精确度）

反映系统误差和随机误差综合大小的程度。

### 2. 精密度

反映偶然误差大小的程度。

### 3. 正确度

反映系统误差大小的程度。

对于实验来说，精密度高则正确度不一定高，同样正确度高的精密度也不一定高，但准确度高则精密度和正确度都高。准确度、精密度和正确度关系示意如图 1-3 所示，图 1-3 (a) 为系统误差与随机误差都小，即准确度高。图 1-3 (b) 为系统误差大，而随机误差小，即正确度低而精密度高。图 1-3 (c) 为系统误差小 [与图 1-3 (b) 相比]，而随机误差大，正确度高而精密度低。

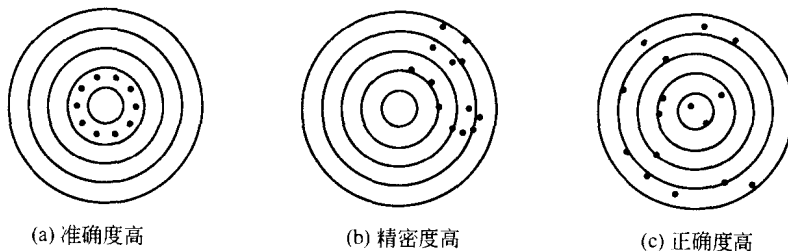


图 1-3 准确度、精密度和正确度关系示意

## 第三节 随机误差的正态分布

### 一、随机误差的正态分布

#### 1. 正态分布

通过大量的测量与实践，人们发现随机误差的分布服从正态分布又称高斯（Gauss）误差分布，其分布曲线如图 1-4 所示。图中横坐标为随机误差，纵坐标为概率密度分布函数  $f(\delta)$ 。

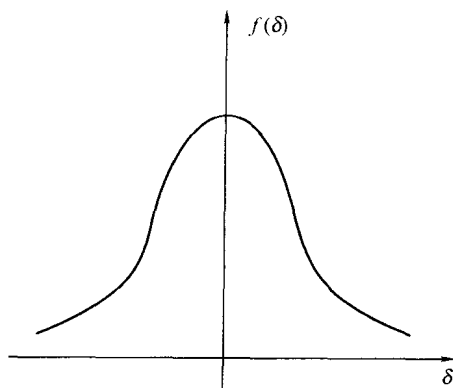


图 1-4 正态分布曲线

落在  $\delta$  和  $(\delta+d\delta)$  之间的随机误差的概率可用式 (1-7) 表示。

$$P(\delta) = f(\delta) d\delta \quad (1-7)$$

正态分布具有如下特征。

#### (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

绝对值相等的误差，正负出现的概率大致相等。

#### (3) 有界性

在一定测量条件下，误差的绝对值实际上不超过一定的界限。

#### (4) 抵偿性

在同一条件下对同一量测量，各误差  $\delta_i$  的算术平均值，随测量次数增加而趋于零。即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{\infty} \delta_i = 0$$

#### 2. 算术平均值与方差

设在等精度条件下，对被测量值进行  $n$  次测量，得测量值为  $x_1, x_2, \dots, x_l, x_n$ ，其随机误差为  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_l, \delta_n$ ，则测得结果的算术平均值为

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



测得结果的方差可表示为

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

方差  $\sigma^2$  的算术平方根  $\sigma$ , 称为标准误差, 即

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (1-10)$$

### 3. 有限次数的标准误差

在测量值中已消除系统误差的情况下, 测量次数无限增多, 所得的平均值为真值; 当测量次数有限时, 所得的平均值为最佳值, 它不等于真值, 因此测量值与真值之差 (误差) 和测量值与平均值之差 (残差) 不等。在实际工作中, 测量次数是有限的, 所以需要找出用残差表示的误差公式。

用残差表示的标准误差  $\hat{\sigma}$  为

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n-1}} \quad (1-11)$$

式中  $V_i$ ——测量值  $x_i$  和平均值  $\bar{x}$  的差, 即  $V_i = x_i - \bar{x}$ ;  
 $n$ ——测量值数目。

这里将有限次数的标准误差用  $\hat{\sigma}$  表示, 以区别  $n \rightarrow \infty$  时的标准误差  $\sigma$ , 不过在实际应用时, 一般不加区别, 均写为  $\sigma$ 。

## 二、概率密度分布函数

高斯 (Gauss) 于 1795 年, 提出了随机误差的正态分布概率密度函数。

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-12)$$

或

$$f(\delta) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 \delta^2} \quad (1-13)$$

式中  $\delta$ ——随机误差;  
 $\sigma$ ——标准误差;  
 $h$ ——精密度指数。

## 三、随机误差的表达方法

### 1. 精密度指数

精密度指数 ( $h$ ) 反映了随机误差的大小程度, 定义为

$$h = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma} \quad (1-14)$$

精密度与分布曲线的关系如图 1 5 所示, 当  $h$  越大时, 曲线越尖锐, 说明了随机误差的离散性越小, 即小误差出现的机会多, 而大误差出现的机会少, 这就意味着测量的精密度越高。反之, 当  $h$  越小时, 曲线越平坦, 说明了随机误差的离散性越大, 即小误差出现的机会变少, 而大误差出现的机会增多, 这意味着测量的精密度越低。