

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



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材之配套教材

中国石油和化学工业优秀教材奖

化工原理实验

第二版

杨祖荣 主编



化学工业出版社

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
中国石油和化学工业优秀教材奖

化工原理实验

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材之配套教材

第二版

杨祖荣 主编



化学工业出版社

·北京·

本书为化工原理实验教材，内容包括：实验数据的测量及误差分析；实验数据的处理与实验设计方法；化工实验常用参数测控技术；化工原理及化工基础实验；计算机数据处理及实验仿真；化工原理实验常用仪器仪表及附表等。本书理论联系实际，强调工程观点和方法论，同时还适当介绍了计算机测控技术和数据处理方法。

本书可作为大专院校化工原理实验教材，也可供化工、生物化工、环境及相关部门的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理实验/杨祖荣主编. —2版. —北京: 化学工业出版社, 2014.1

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
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材之配套教材

ISBN 978-7-122-19092-5

I. ①化… II. ①杨… III. ①化工原理-实验-高等学校-教材 IV. ①TQ02-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 279235 号

责任编辑: 杨 菁

文字编辑: 刘莉珺

责任校对: 王素芹

装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 8¼ 字数 197 千字 2014 年 2 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 19.00 元

版权所有 违者必究

前言

本书是教育部教学改革工程世行贷款 21 世纪高等教学改革项目《化工类人才培养模式、教学内容、教学方法和教学技术改革的研究与实施》的研究成果之一。本书第一版 2007 年获得第八届中国石油和化学工业优秀教材一等奖。

本书以化工单元操作实验研究中常用的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、化工实验常用仪表及控制技术、化工原理基础实验及综合实验、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、课程与课程之间的相互渗透，推动了各学科与课程的改革和发展。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。十多年来，我们先后开发了流体阻力、离心泵性能、板框及动态过滤、传热、精馏、吸收、流化床干燥、萃取、萃取蒸馏等单元实验装置，并多次改进它们的性能，积累了一些小型化工单元实验装置开发、设计的经验，我们在本书部分实验中，增加了开发、设计要点，以供读者实践时参考。

本书由杨祖荣主编，参加编写的还有曹仲义、王宇、黄海、陈旭东、赵东等。本书承蒙清华大学雷良恒教授主审，并提出宝贵意见。在编写过程中，编者的同事丁仲伟教授等给予了热情的支持和帮助，在此向他们表示深切的谢意。由于编者的学识和经验有限，书中不妥之处，衷心希望读者指正。

编者

2013 年 6 月

第一版前言

本书是教育部教学改革工程世行贷款 21 世纪高等教学改革项目《化工类人才培养模式、教学内容、教学方法和教学技术改革的研究与实施》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、化工实验常用仪表及控制技术、化工原理基础实验及综合实验、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、课程与课程之间的相互渗透,推动了各学科与课程的改革和发展。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。我们分别对流体阻力、离心泵性能、板框及动态过滤、传热、精馏、吸收、流化床干燥七种单元实验装置进行了研发,以摸索经验,并介绍给读者。

本书由杨祖荣主编,参加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,再加上编者的学识和经验有限,书中不妥之处,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、化工原理实验的进行及注意事项	1
三、实验室规则	2
第一章 实验数据的测量及误差分析	3
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	11
第五节 最可信赖值的求取	14
一、常用的平均值	14
二、最小二乘法原理与算术平均值的意义	15
第二章 实验数据的处理与实验设计方法	17
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	24
第三节 正交实验设计	25
一、正交实验设计方法	25
二、正交实验设计注意事项	27
重要符号表	27
第三章 化工实验常用参数测控技术	28
第一节 温度测量及控制	28
一、热膨胀式温度计	29
二、热电偶温度计	30
三、热电阻温度计	32
四、温度计的标定	33
五、温度控制技术	33
六、温度计安装使用注意事项	33
第二节 压力、压差测量及控制	34
一、常用检测元件及原理	34
二、压力的控制技术	37
三、压力传感器安装使用注意事项	38
第三节 流量测量	39
一、差压式流量计	39
二、转子流量计	39
三、涡轮流量计	39
四、质量流量计	40
五、流量的控制技术	40
六、流量传感器安装使用注意事项	41
第四节 功率测量	41
一、单相功率	41
二、三相功率	41
三、功率信号的检测方法	42
四、泵轴功率的测量	42
第四章 化工原理及化工基础实验	43
实验一 流体流动阻力的测定	43
实验二 离心泵性能实验	47
实验三 板框及动态过滤实验	51
实验四 传热膜系数测定实验	56
实验五 精馏实验	59

实验六 氧解吸实验	63
实验七 流化床干燥实验	69
实验八 萃取实验	74
实验九 萃取精馏制取无水乙醇实验	76
实验十 雷诺演示实验	78
实验十一 流体机械能转换演示实验	79
实验十二 温度、流量、压力校正实验	81
重要符号表	85
第五章 计算机数据处理及实验仿真	87
第一节 计算机数据处理	87
一、用 Excel 完成实验数据处理	87
二、使用 MATLAB 完成实验数据处理	88
第二节 实验仿真	93
一、仿真简介	93
二、化工原理仿真实验软件	94
第六章 化工原理实验常用仪器仪表	98
第一节 人工智能调节器	98
一、面板说明	98
二、基本使用操作	99
三、使用示例	99
第二节 阿贝折光仪	99
一、工作原理与结构	99
二、使用方法	100
三、注意事项	101
第三节 YSI-550A 溶氧仪	101
一、YSI-550A 溶氧仪氧探头基本结构	101
二、工作原理	101
三、标定	102
四、测量	102
五、注意事项	102
第四节 FLUKE-45 双显多用表简介	103
一、面板说明	103
二、操作指南	103
三、注意事项	104
第五节 变频器	104
一、面板说明	104
二、变频器简易操作步骤	105
三、操作示例	105
附录	106

附录一	常用数据表	106
附录二	正交表	115
附录三	F 分布数值表	118
附录四	实验常见故障	121
参考文献	123

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、课程设计等教学环节构成一个有机的整体。化工原理实验与化学实验不同之处在于它具有明显的工程特点，即具有工程或中间试验规模。因此，它所得到的结论，对于化工单元设备与过程的设计和操作，具有重要的指导意义。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和基础数据，初步掌握化工单元设备与过程的设计能力；

⑤ 提高计算、分析问题及编写科学实验报告的能力，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、化工原理实验的进行及注意事项

① 实验前，应认真预习教材中的有关理论，明确实验目的的要求，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。为了保证实验能够顺利进行，应预先做出原始数据的记录表格，并要对所测数据及其变化趋势，力求做到心中有数，即对实验的预期结果、可能发生的故障及其排除方法，做出预测和预案。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。

② 实验过程中，应认真操作，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。实验中发生的各种现象，要加以思考、分析。对测得的数据，要考虑它们是否合理，若出现数据重复性差，甚至反常现象，务必找出原因加以解决，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 实验做完后，应认真地完成实验报告的整理、编写工作。编写报告是整个实验的最后环节，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和工程的语言进行表达。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，提高计算与分析问题的能力和编写科技实验报告的能力。

实验报告应包括以下内容：

- ① 报告题目；
- ② 实验时间，报告人，同组人；
- ③ 实验目的及任务；
- ④ 所依据的基本理论；
- ⑤ 实验装置示意图及主要测试仪器仪表；
- ⑥ 实验操作要点；
- ⑦ 实验数据的整理、计算示例；
- ⑧ 实验结果及结论的归纳与总结；
- ⑨ 分析讨论；
- ⑩ 参考文献；

⑪ 对部分专业学生，要求写报告摘要和关键词，并列于报告之首。[摘要应简明阐述本实验的工艺条件，如温度、压力、物系；实验装置及重要测量仪器；研究或测定的目的；所得到的结果（经验关联式），并与公认值比较。一般在 200 字左右。]

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 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。

⑥ 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。

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。为了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，下面就这方面的基本知识加以介绍。

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，经常会遇到两类数字。

(1) 无量纲量，这一类数据都没有量纲，例如：圆周率 (π)、自然对数 (e)，以及一些经验公式的常数值、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) 另一类数据是有量纲的数据，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)、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所决定的估计数字。就这类数据的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）、用秒表测量时间等等。直接测量值的有效数字的位数取决于测量仪器的精度。测量时，一般有效数字的位数可保留到测量仪器的最小刻度后一位，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，其大小可能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是以 1×10^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。

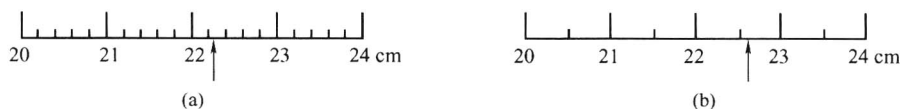


图 1-2 不同最小刻度的刻度尺示数的读取

其数据可记为：

- ① 22.3cm，有效数字为 3 位；
- ② 22.7cm，有效数字为 3 位。

3. 间接测量时，有效数字的选取

在实验过程，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时，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来表示的，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”我们必须注意，50g 不一定是 50.00g，它们的有效数字位数不同，前者为 2 位，后者有 4 位，而 0.050g 虽然有 4 位数字，但有效数字仅有 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，可采用科学记数法进行表示。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 的整数幂来表示数值的数量级。例如：若 981000 的有效数字为 4 位，就可以写成 9.810×10^5 ，若其只有 3 位有效数字就可以写成 9.81×10^5 。

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，则要采用如下方法。

- (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，则不变；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：

$$\begin{array}{ll} 25.44 \rightarrow 25.4 & 25.45 \rightarrow 25.4 \\ 25.47 \rightarrow 25.5 & 25.55 \rightarrow 25.6 \end{array}$$

3. 有效数据的运算规则

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, 应写成

$$13.65 + 0.01 + 1.63 = 15.29$$

(2) 在乘除运算中, 各数所保留的位数, 以原来个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, 应写成:

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

(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。误差是普遍存在于测量过程中的, 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, 常通过如下方法来选取真值。

1. 理论真值

这一类真值是可以理论证实而知的值。例如: 平面三角形的内角和为 180° ; 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, 测量的次数为无限多, 则根据误差分布定律, 正负误差出现的概率相等, 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, 测量结果 (x) 与该物理量真值 (μ) 之间的差异, 称为绝对误差,

记为 δ ，简称误差。

$$\text{绝对误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

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

在工程计算中，真值常用算术平均值 (\bar{x}) 或相对真值代替，则上式可写为：

$$\text{绝对误差} = \text{测量值} - \text{精确测量值} = \text{测量值} - \text{算术平均值}$$

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

2. 相对误差

绝对误差与真值的比值，即为相对误差，即

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

相对误差可以清楚地反映出测量的准确程度，如下式：

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

当绝对误差很小时，测量值/绝对误差 $\gg 1$ ，则有

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

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）：

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

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，把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%，则它的精度等级就是 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

根据误差产生的因素及其性质，可将误差分为三类：系统误差、随机误差和过失误差。

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。

系统误差的产生通常有以下几点原因。

- (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 由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、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。

由于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 (又称随机误差)

偶然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、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,常用精密度一词来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 (又称粗差)

过失误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读成了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粗差,即所有的坏值都要剔除。坏值的剔除方法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。如图1-3所示,(a)为系统与随机误差都小,即准确度高。(b)为系统误差大,而随机误差小,即正确度低而精密度高。(c)为系统误差小[与(b)相比],而随机误差大,正确度高而精密度低。

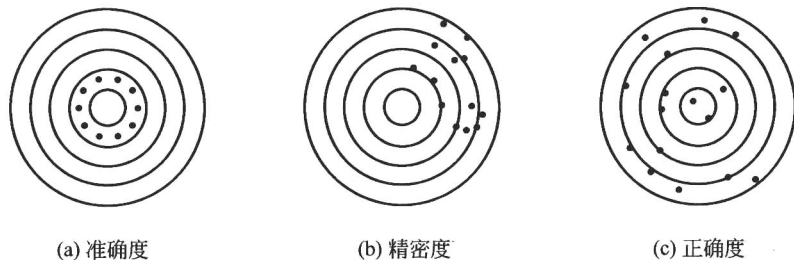


图 1-3 准确度、精密度和正确度关系示意

第三节 随机误差的正态分布

——高斯 (Gauss) 误差分布

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, 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 $f(\delta)$ 。

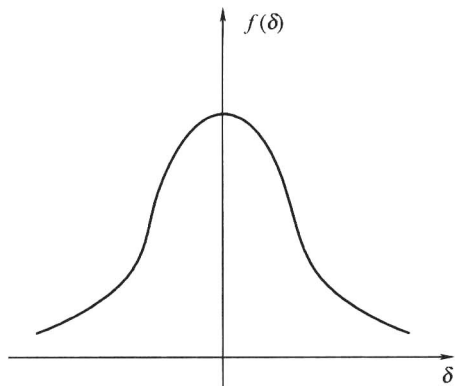


图 1-4 正态分布曲线

落在 δ 和 $(\delta + d\delta)$ 之间的随机误差的概率可用下式表示:

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

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 δ_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 σ^2 的算术平方根 σ 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