

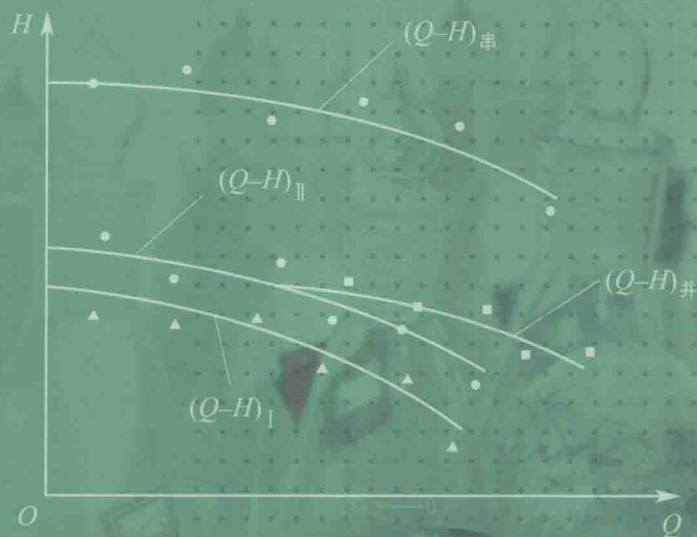
高 / 等 / 学 / 校 / 教 / 材

# 化工原理实验

王雪静 朱芳坤 主编

第2版

HUAGONG  
YUANLI  
SHIYAN



化学工业出版社

高 / 等 / 学 / 校 / 教 / 材

# 化工原理实验

王雪静 朱芳坤 主编

李晓波 副主编

乔梅英 参编

## 第2版

# HUAGONG YUANLI SHIYAN



化学工业出版社

北京

定价：35.00元

ISBN 978-7-122-25000-1

化学工业出版社

化学工业出版社

化学工业出版社

《化工原理实验（第2版）》保持第一版的体系、结构不变，内容进行了全面修订。替换了一些实验，增加了仿真实验部分。内容包括实验误差分析和有效数字、实验数据处理、正交实验设计、化工实验测量技术、仿真实验。本书侧重实验方法的建立、实验设计以及与仪器仪表和计算机技术相结合的化工知识，可以有效地培养学生的创造性思维和动手实践能力。

《化工原理实验（第2版）》可以作为化学化工、生物工程、制药工程、食品工程等专业的化工原理实验课教材，也可供化工专业研究和企事业单位技术人员选用或参考。

# 化工原理实验

主编：朱芳坤 王雪静

副主编：李淑琴

副主编：英研秀

## 图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理实验/王雪静，朱芳坤主编。—2版。—北京：化学工业出版社，2015.3  
高等学校教材  
ISBN 978-7-122-22969-4

I. ①化… II. ①王…②朱… 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 (2015) 第 026353 号

责任编辑：刘俊之

装帧设计：史利平

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：大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张8¼ 字数201千字 2015年4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：22.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

《化工原理实验》自2009年出版以来,满足了高等学校化工原理实验教学的需要。随着高等教育改革,为了适应新的培养方案,实验课时增加,同时也为了提高本书的质量,我们本着对读者负责和精益求精的精神,对原书通篇进行字斟句酌的思考、研究,力求防止和消除一切瑕疵和错误,对全书进行了一次全面修订。除了修订原书的疏漏之处,替换了一些实验,增加了仿真实验,充实书的内容。关于本书的具体修订工作,特作以下几点说明:

1. 基本保持原书的体系、结构不变,修订了原书的疏漏之处;
  2. 替换了两个实验,实验二、三,另外增加了第7章仿真实验部分。
- 本书由河南科技学院王雪静、朱芳坤主编,李晓波副主编,乔梅英编写。第1、2、3章及第6章实验一至实验五由王雪静编写,第4章及第6章实验八和实验九由朱芳坤编写,第5章和附录由李晓波编写,第6章实验六、七及第7章仿真实验由乔梅英编写。

在编写过程中,参阅了有关书籍、杂志、兄弟院校的讲义等大量资料,由于篇幅所限,未能一一列举,在此表示衷心感谢。

由于水平所限,书中难免存在不妥之处,衷心希望读者给予批评指正。

2014年12月

|           |     |
|-----------|-----|
| 1. 绪论     | 1   |
| 2. 实验目的   | 2   |
| 3. 实验原理   | 3   |
| 4. 实验装置   | 4   |
| 5. 实验步骤   | 5   |
| 6. 实验数据   | 6   |
| 7. 实验结果   | 7   |
| 8. 实验讨论   | 8   |
| 9. 实验结论   | 9   |
| 10. 参考文献  | 10  |
| 11. 附录    | 11  |
| 12. 参考文献  | 12  |
| 13. 附录    | 13  |
| 14. 参考文献  | 14  |
| 15. 附录    | 15  |
| 16. 参考文献  | 16  |
| 17. 附录    | 17  |
| 18. 参考文献  | 18  |
| 19. 附录    | 19  |
| 20. 参考文献  | 20  |
| 21. 附录    | 21  |
| 22. 参考文献  | 22  |
| 23. 附录    | 23  |
| 24. 参考文献  | 24  |
| 25. 附录    | 25  |
| 26. 参考文献  | 26  |
| 27. 附录    | 27  |
| 28. 参考文献  | 28  |
| 29. 附录    | 29  |
| 30. 参考文献  | 30  |
| 31. 附录    | 31  |
| 32. 参考文献  | 32  |
| 33. 附录    | 33  |
| 34. 参考文献  | 34  |
| 35. 附录    | 35  |
| 36. 参考文献  | 36  |
| 37. 附录    | 37  |
| 38. 参考文献  | 38  |
| 39. 附录    | 39  |
| 40. 参考文献  | 40  |
| 41. 附录    | 41  |
| 42. 参考文献  | 42  |
| 43. 附录    | 43  |
| 44. 参考文献  | 44  |
| 45. 附录    | 45  |
| 46. 参考文献  | 46  |
| 47. 附录    | 47  |
| 48. 参考文献  | 48  |
| 49. 附录    | 49  |
| 50. 参考文献  | 50  |
| 51. 附录    | 51  |
| 52. 参考文献  | 52  |
| 53. 附录    | 53  |
| 54. 参考文献  | 54  |
| 55. 附录    | 55  |
| 56. 参考文献  | 56  |
| 57. 附录    | 57  |
| 58. 参考文献  | 58  |
| 59. 附录    | 59  |
| 60. 参考文献  | 60  |
| 61. 附录    | 61  |
| 62. 参考文献  | 62  |
| 63. 附录    | 63  |
| 64. 参考文献  | 64  |
| 65. 附录    | 65  |
| 66. 参考文献  | 66  |
| 67. 附录    | 67  |
| 68. 参考文献  | 68  |
| 69. 附录    | 69  |
| 70. 参考文献  | 70  |
| 71. 附录    | 71  |
| 72. 参考文献  | 72  |
| 73. 附录    | 73  |
| 74. 参考文献  | 74  |
| 75. 附录    | 75  |
| 76. 参考文献  | 76  |
| 77. 附录    | 77  |
| 78. 参考文献  | 78  |
| 79. 附录    | 79  |
| 80. 参考文献  | 80  |
| 81. 附录    | 81  |
| 82. 参考文献  | 82  |
| 83. 附录    | 83  |
| 84. 参考文献  | 84  |
| 85. 附录    | 85  |
| 86. 参考文献  | 86  |
| 87. 附录    | 87  |
| 88. 参考文献  | 88  |
| 89. 附录    | 89  |
| 90. 参考文献  | 90  |
| 91. 附录    | 91  |
| 92. 参考文献  | 92  |
| 93. 附录    | 93  |
| 94. 参考文献  | 94  |
| 95. 附录    | 95  |
| 96. 参考文献  | 96  |
| 97. 附录    | 97  |
| 98. 参考文献  | 98  |
| 99. 附录    | 99  |
| 100. 参考文献 | 100 |

# 第一版前言

实施科教兴国战略和可持续发展战略，迎接知识经济时代的到来，建设面向知识经济时代的国家创新体系，要求造就一支庞大的高素质的创造型人才队伍。因此，作为高级人才的培养基地，高等院校应当把创造力的教育和培养贯穿于各门课程教学及实践性教学环节中。实践性教学环节相对于课堂理论教学环节，更能贯穿对学生创造力的开发，其教学内容、方法、手段如何能适应创造性人才的培养要求尤为重要。传统的大学实验教学，其内容是以验证前人知识为主的验证型实验，其方法是教师手把手地教，这些都不利于培养学生的主动性和创造性。当今，大学实验教学改革中，普遍开设综合型、设计型、研究型实验，是对学生进行创造教育的重要思路和做法。在“211工程”重点建设的大学必须通过的本科教学评优工作指标中就明确要求综合型、设计型、研究型实验应占70%以上。

《化工原理实验》是一门技术基础实验课，在培养化工类及相关专业的高级人才中起着举足轻重的作用。通过化工原理实验装置将化工知识与计算机技术紧密地结合起来，同时还融合了化学、电工电子、数学、物理及机械等多学科的知识，具有计算机数据采集、处理和等功能，能够针对不同专业的要求开出不同类型的“三型”实验。有了这些高新技术装备的实验装置，我们还必须花大力气进行化工原理实验内容、方法的改革，必须以当代教育思想、教育方法论及教育心理学为指导，研究以学生自主学习为主的启发式、交互式、研讨式、动手式的实验教学方法，从实验方案拟定、实验步骤设计、实验流程装配、实验现象观察、实验数据处理和实验结果讨论等方面有效地培养学生的创造性思维和动手实践能力。《化工原理实验》就是为了适应化工原理实验教学内容、方法、手段的改革要求而编写的。

本书由河南科技学院王雪静、李晓波主编，杨胜凯、朱芳坤、乔梅英、张甲敏编写。第一章由张甲敏编写，第二章、第六章实验一至实验七由王雪静编写，第三章由杨胜凯编写，第四章、第六章实验八和实验九由朱芳坤编写，第五章和附录1~5由李晓波编写，附录6由乔梅英编写。

本书在编写过程中，参阅了有关书籍、杂志、兄弟院校的教材等大量资料，由于篇幅所限，未能一一列举，谨此说明。本书难免存在不妥之处，衷心地希望读者批评指正，使其日臻完善。

编者

2009年4月

# 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....          | 1  |
| 1.1 化工原理实验目的 .....             | 1  |
| 1.2 化工原理实验操作及注意事项 .....        | 1  |
| 1.3 化工原理实验基本要求 .....           | 2  |
| 1.4 实验室安全用电注意事项 .....          | 2  |
| <b>第 2 章 实验误差分析和有效数字</b> ..... | 4  |
| 2.1 误差及其分类 .....               | 4  |
| 2.2 偶然误差的分布 .....              | 7  |
| 2.3 直接测量值的误差估算 .....           | 8  |
| 2.4 间接测量值的误差传递 .....           | 9  |
| 2.5 误差分析应用 .....               | 11 |
| 2.6 提高分析结果准确度的方法 .....         | 13 |
| 2.7 有效数字及其运算规则 .....           | 13 |
| <b>第 3 章 实验数据处理</b> .....      | 15 |
| 3.1 列表法 .....                  | 15 |
| 3.2 图示法 .....                  | 16 |
| 3.3 实验数据数学方程表示法 .....          | 19 |
| 3.4 MATLAB 简介 .....            | 27 |
| <b>第 4 章 正交实验设计</b> .....      | 35 |
| 4.1 概述 .....                   | 35 |
| 4.2 正交实验设计特点 .....             | 35 |
| 4.3 正交表分类 .....                | 38 |
| 4.4 正交设计注意事项 .....             | 39 |
| 4.5 正交表的表头设计 .....             | 40 |
| 4.6 正交实验结果的统计分析方法 .....        | 45 |
| <b>第 5 章 化工实验测量技术</b> .....    | 59 |
| 5.1 压力(差)测量 .....              | 59 |
| 5.2 流量测量 .....                 | 65 |
| 5.3 计算机数据采集与控制 .....           | 74 |
| <b>第 6 章 化工原理基础实验</b> .....    | 79 |
| 实验一 雷诺实验 .....                 | 79 |
| 实验二 流体流动阻力的测定 .....            | 80 |
| 实验三 离心泵性能测定 .....              | 83 |
| 实验四 恒压过滤常数测定实验 .....           | 85 |
| 实验五 传热系数测定 .....               | 88 |
| 实验六 精馏实验 .....                 | 91 |
| 实验七 填料塔吸收传质系数的测定 .....         | 94 |
| 实验八 萃取实验 .....                 | 96 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 化工原理实验目的

《化工原理》是化工、制药、环境、食品、生物工程等专业教学计划中一门必修课程。它主要研究生产过程中各种单元操作的规律，并利用这些规律解决实际生产中的过程问题。该课程紧密联系实际，实践性很强。作为一门研究化工生产过程的工程学科，已形成了完整的教学内容和教学体系。

化工原理实验是学习、掌握和运用《化工原理》必不可少的重要教学环节，与课堂讲授、习题课和课程设计等教学环节构成一个有机的整体。学习和掌握化工原理的实验及其研究方法，是学生从理论学习到工程应用的一个重要实践过程。

化工原理实验与一般化学实验不同之处在于它具有明显的工程特点，它所得到的结论，对于化工单元操作设备的设计、选型具有重要的指导意义。因此通过实验应达到如下目的。

① 通过实验获得感性认识，验证化工过程的基本理论，通过实验从实践中进一步学习，掌握和运用学过的基本理论，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掌握。

② 熟悉实验装置的流程、结构、常用仪表的使用，掌握化工实验的基本方法。

③ 掌握化学工程实验的方法和技巧。例如实验装置的流程，操作条件的确定，测试仪表的选择，过程控制和准确数据的获得，实验操作分析，故障处理等，通过实验操作训练学生的实验技能，提高学生素质。

④ 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，直接服务于化学工程设计的初步能力。

⑤ 提高处理与分析问题的能力。运用计算机计算实验数据，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，训练学生实际计算和组织报告的能力。

⑥ 通过实验培养学生良好的学风和工作作风，以严谨、科学、求实的精神对待科学实验与开发研究工作。

## 1.2 化工原理实验操作及注意事项

(1) 设备启动前的检查。

① 泵、风机、压缩机、电机等转动设备，用手使其运转，从感觉及声响上判别有无异常，检查润滑油位是否正常。

② 设备上各阀门的开、关状态。

③ 接入设备的仪表开、关状态。

(2) 仪器仪表使用前必须做到：

① 熟悉原理与结构；

② 分清量程范围，掌握正确的读数方法。

(3) 操作过程中注意分工配合、精心操作，保证操作过程在稳定条件下进行。产生不正常现象时要及时观察研究，分析其原因，不要轻易放过。

(4) 操作过程中设备及仪表发生问题应立即按停车步骤停车，报告指导教师。同时应分析原因供教师参考。未经教师同意不得自行处理。

(5) 实验结束时应先将有关的热源、水源、气源、仪表的阀门或电源关闭，然后再切断电机电源。

(6) 化工实验要特别注意安全。搞清楚总电闸的位置和灭火器材的安放地点。

### 1.3 化工原理实验基本要求

(1) 在实验前，必须认真预习与实验有关的理论部分，正确理解实验目的、要求和所依据的原理，详细了解实验流程，主要设备的结构，测试仪器及仪表的使用方法。熟悉实验操作步骤，测量记录和整理数据方法，画出实验记录的数据表格。对实验的预期结果，可能发生的故障及其排除方法等，力求做到心中有数。

(2) 在实验过程中，应当集中精力进行操作，实事求是地记录仪表上显示的数据，同时又要细心地观察，注意发现问题，进行深入思考。对于实验中出现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。对实验过程中出现数据重复性差、规律性差的情况，甚至反常现象，应找出原因加以解决或做出合理的解释。

(3) 实验做完后，应严肃认真地完成实验报告的整理、编写工作。

编写实验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一环。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语言表达出来。

实验报告必须书写工整，图表清晰，结论明确，分析中肯。报告应包括以下各项：

① 报告题目；

② 实验时间、报告人、同组人；

③ 实验目的；

④ 实验原理；

⑤ 实验步骤；

⑥ 实验数据处理过程；

⑦ 实验结果及结论；

⑧ 问题讨论。

### 1.4 实验室安全用电注意事项

化工原理实验中电器设备较多，某些设备的电负荷也较大。在接通电源之前，必须认真检查电器设备和电路是否符合规定要求，对于直流电设备应检查正负极是否接对。必须搞清楚整套实验装置的启动和停车操作顺序，以及紧急停车的方法。注意安全用电，对电器设备必须采取安全措施。操作者必须严格遵守下列操作规定。

(1) 进行实验之前必须了解室内总电闸与分电闸的位置，以便出现用电事故时及时切断



各电源。

(2) 电器设备维修时必须停电作业。

(3) 带金属外壳的电器设备都应该保护接零，定期检查是否联结良好。

(4) 导线的接头应紧密牢固，接触电阻要小。裸露的接头部分必须用绝缘胶布包好，或者用绝缘管套好。

(5) 所有的电器设备在带电时不能用湿布擦拭，更不能有水落于其上。电器设备要保持干燥清洁。

(6) 电源或电器设备上的保护熔断丝或保险管，都应按规定电流标准使用。严禁私自加粗保险丝或用铜或铝丝代替。当熔断保险丝后，一定要查找原因消除隐患，而后再换上新的保险丝。

(7) 电热设备不能直接放在木制实验台上使用，必须用隔热材料垫架，以防引起火灾。

(8) 发生停电现象必须切断所有的电闸。防止操作人员离开现场后，因突然供电而导致电器设备在无人监视下运行。

(9) 合闸动作要快，要合得牢。合闸后若发现异常声音或气味，应立即拉闸，进行检查。如发现保险丝熔断，应立刻检查带电设备上是否有问题，切忌不经检查便换上熔断丝或保险管就再次合闸，这样会造成设备损坏。

(10) 离开实验室前，必须把实验室的总电闸拉下。

1.1.2 误差的表示方法

1.1.2.1 绝对误差

1.1.2.2 相对误差

1.1.2.3 绝对误差和相对误差

1.1.2.4 误差的表示方法

1.1.2.5 误差的表示方法

1.1.2.6 误差的表示方法

1.1.2.7 误差的表示方法

1.1.2.8 误差的表示方法

1.1.2.9 误差的表示方法

1.1.2.10 误差的表示方法

1.1.2.11 误差的表示方法

1.1.2.12 误差的表示方法

1.1.2.13 误差的表示方法

1.1.2.14 误差的表示方法

1.1.2.15 误差的表示方法

1.1.2.16 误差的表示方法

1.1.2.17 误差的表示方法

1.1.2.18 误差的表示方法

1.1.2.19 误差的表示方法

1.1.2.20 误差的表示方法

1.1.2.21 误差的表示方法

1.1.2.22 误差的表示方法

1.1.2.23 误差的表示方法

1.1.2.24 误差的表示方法

1.1.2.25 误差的表示方法

1.1.2.26 误差的表示方法

1.1.2.27 误差的表示方法

1.1.2.28 误差的表示方法

1.1.2.29 误差的表示方法

1.1.2.30 误差的表示方法

1.1.2.31 误差的表示方法

1.1.2.32 误差的表示方法

1.1.2.33 误差的表示方法

1.1.2.34 误差的表示方法

1.1.2.35 误差的表示方法

1.1.2.36 误差的表示方法

1.1.2.37 误差的表示方法

1.1.2.38 误差的表示方法

1.1.2.39 误差的表示方法

1.1.2.40 误差的表示方法

1.1.2.41 误差的表示方法

1.1.2.42 误差的表示方法

1.1.2.43 误差的表示方法

1.1.2.44 误差的表示方法

1.1.2.45 误差的表示方法

1.1.2.46 误差的表示方法

1.1.2.47 误差的表示方法

1.1.2.48 误差的表示方法

1.1.2.49 误差的表示方法

1.1.2.50 误差的表示方法

1.1.2.51 误差的表示方法

1.1.2.52 误差的表示方法

1.1.2.53 误差的表示方法

1.1.2.54 误差的表示方法

1.1.2.55 误差的表示方法

1.1.2.56 误差的表示方法

1.1.2.57 误差的表示方法

1.1.2.58 误差的表示方法

1.1.2.59 误差的表示方法

1.1.2.60 误差的表示方法

1.1.2.61 误差的表示方法

1.1.2.62 误差的表示方法

1.1.2.63 误差的表示方法

1.1.2.64 误差的表示方法

1.1.2.65 误差的表示方法

1.1.2.66 误差的表示方法

1.1.2.67 误差的表示方法

1.1.2.68 误差的表示方法

1.1.2.69 误差的表示方法

1.1.2.70 误差的表示方法

1.1.2.71 误差的表示方法

1.1.2.72 误差的表示方法

1.1.2.73 误差的表示方法

1.1.2.74 误差的表示方法

1.1.2.75 误差的表示方法

1.1.2.76 误差的表示方法

1.1.2.77 误差的表示方法

1.1.2.78 误差的表示方法

1.1.2.79 误差的表示方法

1.1.2.80 误差的表示方法

1.1.2.81 误差的表示方法

1.1.2.82 误差的表示方法

1.1.2.83 误差的表示方法

1.1.2.84 误差的表示方法

1.1.2.85 误差的表示方法

1.1.2.86 误差的表示方法

1.1.2.87 误差的表示方法

1.1.2.88 误差的表示方法

1.1.2.89 误差的表示方法

1.1.2.90 误差的表示方法

1.1.2.91 误差的表示方法

1.1.2.92 误差的表示方法

1.1.2.93 误差的表示方法

1.1.2.94 误差的表示方法

1.1.2.95 误差的表示方法

1.1.2.96 误差的表示方法

1.1.2.97 误差的表示方法

1.1.2.98 误差的表示方法

1.1.2.99 误差的表示方法

1.1.2.100 误差的表示方法

## 第2章 实验误差分析和有效数字

### 2.1 误差及其分类

化工原理实验是一门实验科学，实验工作大部分是定量地研究因果关系，这就要涉及物理量的测量，例如我们测量的流量、体积、密度以及压强等。在测定某一物理量时，往往要求实验结果具有一定的准确度。否则将导致错误的结论。由于实验方法和实验设备的不完善、周围环境的影响、人的观察力以及测量程序等限制，实验观测值和真值之间总是存在一定的差异。人们常用绝对误差、相对误差或有效数字来说明一个近似值的准确程度。为了评定实验数据的精确性或误差，认清误差的来源及其影响，需要对实验的误差进行分析和讨论。由此可以判定哪些因素是影响实验精确度的主要方面，从而在以后实验中，进一步改进实验方案，缩小实验观测值和真值之间的差值，提高实验的精确性。

#### 2.1.1 误差的定义及表示方法

化工实验离不开对物理量的测量，测量有直接的，也有间接的。由于仪器、实验条件、环境等因素的限制，测量不可能无限精确，物理量的测量值与客观存在的真实值之间总会存在着一定的差异，这种差异就是测量误差。

设被测量的真值（真正的大小）为 $a$ ，测得值为 $x$ ，误差为 $\epsilon$ ，则

$$\epsilon = x - a$$

误差与错误不同，错误是应该而且可以避免的，而误差是不可能绝对避免的。从实验的原理，实验所用的仪器及仪器的调整，到对物理量的每次测量，都不可避免地存在误差，并贯穿于整个实验始终。

真值是待测物理量客观存在的确定值，也称理论值或定义值。通常真值是无法测得的，是一个理想值。若在实验中，测量的次数无限多时，根据误差的分布定律，正负误差的出现概率相等。再经过细致地消除系统误差，将测量值加以平均，可以获得非常接近于真值的数值。常用的平均值有下列几种。

① 算术平均值 算术平均值是最常见的一种平均值。

设 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $\dots$ 、 $x_n$ 为各次测量值， $n$ 代表测量次数，则算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2-1)$$

② 几何平均值 几何平均值是将 $n$ 个测量值连乘并开 $n$ 次方求得的平均值。即

$$\bar{x}_L = \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n} \quad (2-2)$$

③ 均方根平均值

$$\bar{x}_R = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (2-3)$$

④ 对数平均值 在化工计算中经常用到对数平均值。

设两个量  $x_1$ 、 $x_2$ ，其对数平均值为

$$\bar{x}_{\text{对}} = \frac{x_1 - x_2}{\ln x_1 - \ln x_2} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (2-4)$$

当  $1/2 \leq x_1/x_2 \leq 2$  时，可以用算术平均值代替对数平均值，引起的误差不超过 4%。

### 2.1.2 误差的分类

根据误差的性质和产生的原因，一般分为三类。

(1) 系统误差 系统误差是指在测量和实验中未发觉或未确认的因素所引起的误差。系统误差使实验结果永远朝一个方向偏移（偏高或偏低），即具有单向性。实验条件一经确定，系统误差就获得一个恒定值，当改变实验条件时，系统误差的大小也发生变化。

根据系统误差产生的原因，可将其分为以下几种。

① 方法误差 这种误差是实验方法本身造成的。例如，在滴定分析中反应未进行完全，在重量分析中沉淀发生溶解等。

② 仪器误差 由于仪器因素所造成的误差。如刻度不准，仪表零点未校正或标准表本身存在偏差等。

③ 操作误差 操作人员的操作与正确操作有差别引起的误差。如称取样品时试样吸水了，洗涤沉淀时沉淀流失一部分。

④ 主观误差 由于测量者的固有习惯等在测量中造成的误差。如滴定分析时，判断终点时有的人偏深，有的人偏浅。

(2) 偶然误差 在已消除系统误差的一切测量值的观测中，所测数据仍在末一位或末两位数字上有差别，而且它们的绝对值和符号的变化，时大时小，时正时负，没有确定的规律，这类误差称为偶然误差或随机误差。偶然误差产生的原因不明，因而无法控制和补偿。但是，倘若对某一量值作足够多次的等精度测量，就会发现偶然误差完全服从统计规律，误差的大小或正负的出现完全由概率决定。因此，随着测量次数的增加，随机误差的算术平均值趋近于零，所以多次测量结果的算数平均值将更接近于真值。

(3) 过失误差 过失误差是一种显然与事实不符的误差，它往往是由于实验人员粗心大意、操作不正确等原因引起的。此类误差无规则可寻，只要加强责任感、多方警惕、细心操作，过失误差是可以避免的。

### 2.1.3 准确度和精密度

准确度表示分析结果与真实值接近的程度。它反映系统误差的影响大小，准确度高就表示系统误差小。

精密度表示多次测量中，每次分析结果相互接近的程度。它反映测量中所有系统误差和偶然误差综合的影响程度。

在一组测量中，精密度高的准确度不一定高，准确度高的精密度也不一定高。

为了说明精密度与准确度的区别，可用下述打靶的例子来说明，如图 2-1 所示。

图 2-1(a) 中表示系统误差小，随机误差大，精密度和准确度都不好；图 2-1(b) 表示系统误差大，随机误差小，精密度很好，但准确度却不高；图 2-1(c) 表示系统误差和随机误差都很小，精密度与准确度都很好。

### 2.1.4 误差的表示方法

利用任何量具或仪器进行测量时，总存在误差，测量结果不可能等于被测量的真值，而

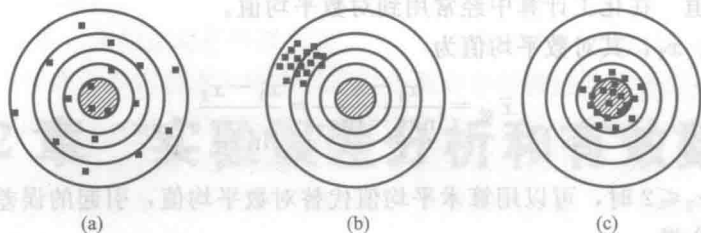


图 2-1 精密度和准确度的关系

只是它的近似值，可以根据测量误差的大小来估计测量的准确度，测量结果的误差愈小，测量就愈准确，误差的大小可以用绝对误差和相对误差来表示

(1) 绝对误差 测量值  $x$  和真值  $U_0$  之差为绝对误差，记为

$$d = x - U_0 \quad (2-5)$$

绝对误差反映测量值偏离真值的大小。

(2) 相对误差 衡量某一测量值的准确程度，一般用相对误差来表示。绝对误差  $d$  与真值  $U_0$  的百分比值称为相对误差。记为

$$E_r = \frac{d}{U_0} \times 100\% \quad (2-6)$$

真值是无法得到的，在实际分析中，往往用多次测量的平均值来代替真值。

绝对误差可以表示一个测量结果的可靠程度，而相对误差则可以比较不同测量结果的可靠性。例如，测量两条线段的长度，第一条线段用最小刻度为毫米的刻度尺测量时读数为 10.3mm，绝对误差为 0.1mm，相对误差为 0.97%；第二条线用上述测量工具测出的结果分别为 19.6mm，绝对误差仍为 0.1mm，相对误差为 0.51%。比较这两条线的测量结果，可以看到，用相同的测量工具测量时，绝对误差没有变化，相对误差却不一样。被测量的数值越大，测量结果的相对误差就越小。

(3) 算术平均误差 算术平均误差是各个测量点误差的平均值。

$$\delta_{\bar{x}} = \frac{\sum |d_i|}{n} \quad (2-7)$$

式中  $n$ ——测量次数；

$d_i$ ——第  $i$  次测量的误差。

(4) 标准误差 标准误差亦称为均方根误差。其定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}} \quad (2-8)$$

上式适用于无限次测量的场合。

实际测量工作中，测量次数是有限的，则改用下式

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}} \quad (2-9)$$

标准误差不是一个具体的误差， $\sigma$  的大小只说明在一定条件下每一个观测值对其算术平均值的分散程度，如果  $\sigma$  的值愈小则说明每一次测量值对其算术平均值分散度就小，测量的精度就高，反之精度就低。

在化工原理实验中最常用的 U 形管压力计、转子流量计、秒表、量筒、电压等仪表原则上均取其最小刻度值为最大误差，而取其最小刻度值的一半作为绝对误差计算值。

## 2.2 偶然误差的分布

产生偶然误差的原因很多，例如读数时，视线的位置不正确，测量点的位置不准确，实验仪器由于环境温度、湿度、电源电压不稳定、振动等因素的影响而产生微小变化等，这些因素的影响一般是微小的，而且难以确定某个因素产生的具体影响的大小，因此偶然误差难以找出原因加以排除。

但是实验表明，大量次数的测量所得到的一系列数据的偶然误差都服从一定的统计规律，可以用频数分布来表示偶然误差的统计规律。

### 2.2.1 频数分布

例如用吸光光度法测量某矿石中铁的含量。由于偶然误差的存在，分析结果有高有低，多次测量，参差不齐，即测量数据具有分散性。但如果编制出频数分布图，就可以发现其中的规律，频数是每组测量值出现的次数，图 2-2 是铁的含量频数分布图。

由图 2-2 可见铁含量的分布规律。

(1) 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会多，即误差的概率与误差的大小有关，这是误差的单峰性。

(2) 绝对值相等的正误差或负误差出现的次数相当，即误差的概率相同，这是误差的对称性。

(3) 极大的正误差或负误差出现的概率都非常小，即大的误差一般不会出现，这是误差的有界性。

(4) 随测量次数增加，偶然误差的算术平均值趋近于零，这叫误差的抵偿性。

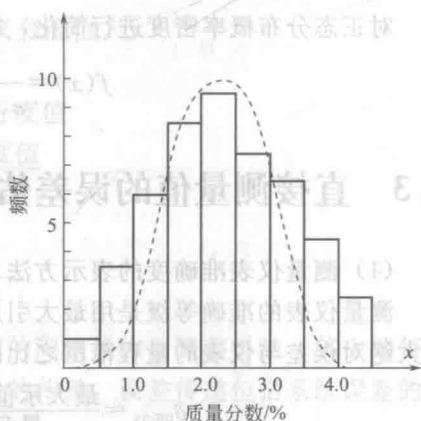


图 2-2 铁含量的频数分布图

### 2.2.2 分布函数

在数据测量时，如果测量数据非常多，组分分得非常细，直方图的形状将逐渐趋于一条直线，即正态分布曲线（图 2-2 中虚线），其数学表达式为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2-10)$$

式中  $f(x)$ ——概率密度；

$\mu$ ——分布曲线最高点，是总体平均值，在没有系统误差的情况下就是真值；

$\sigma$ ——标准误差，是总体平均值  $\mu$  和曲线拐点间的距离。不同  $\sigma$  的误差分布曲线如图 2-3 所示。

正态分布曲线与横坐标所夹的面积，就是测量值出现的概率的总和（图 2-4），其值应为 1，即

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = 1 \quad (2-11)$$

测量值出现在某一范围内的概率，等于概率密度在该范围内的积分，即

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (2-12)$$

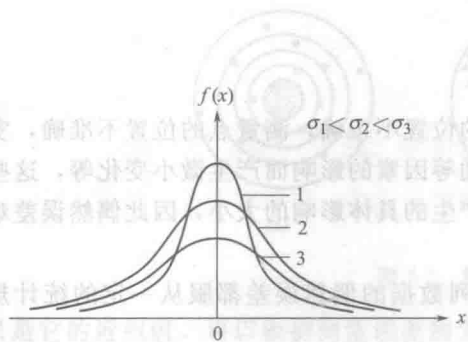
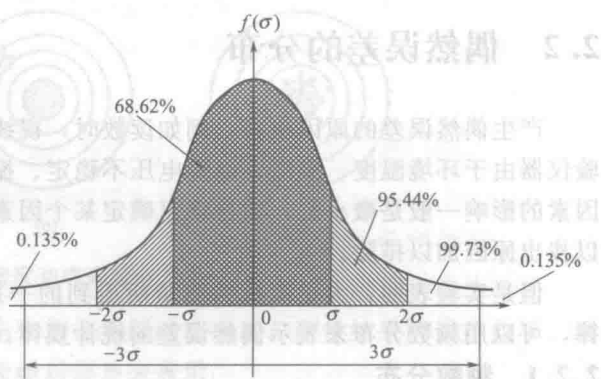
图 2-3 不同  $\sigma$  的误差分布曲线

图 2-4 误差分布曲线的积分

对正态分布概率密度进行简化, 得到“标准正态分布”曲线

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad \text{其中 } u = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (2-13)$$

## 2.3 直接测量值的误差估算

(1) 测量仪表准确度的表示方法

测量仪表的准确等级是用最大引用误差 (又称允许误差) 来标明的, 等于仪表示值中的最大绝对误差与仪表的量程范围之比的百分数。

$$\delta_{\text{nmax}} = \frac{\text{最大示值绝对误差}}{\text{量程范围}} \times 100\% = \frac{d_{\text{max}}}{x_n} \times 100\% \quad (2-14)$$

式中  $\delta_{\text{nmax}}$  —— 仪表的最大测量引用误差;

$d_{\text{max}}$  —— 仪表示值的最大绝对误差;

$x_n$  —— 量程范围, 其值等于标尺上限值—标尺下限值。

通常情况下是用标准仪表校验较低级的仪表。所以, 最大示值绝对误差就是被校表与标准表之间的最大绝对误差。

测量仪表的准确度等级是国家统一规定的, 把允许误差中的百分号去掉, 剩下的数字就称为仪表的精度等级。仪表的精度等级常以圆圈内的数字标明在仪表的面板上。例如某压力计的允许误差为 1.5%, 这台压力计电工仪表的精度等级就是 1.5, 通常简称 1.5 级仪表。

(2) 测量误差的估算

仪表的准确度等级为  $a$ , 它表明仪表在正常工作条件下, 其最大引用误差的绝对值  $\delta_{\text{nmax}}$  不能超过的界限, 即

$$\delta_{\text{nmax}} = \frac{d_{\text{max}}}{x_n} \times 100\% \leq a\% \quad (2-15)$$

由式(2-15)可知, 在应用仪表进行测量时所能产生的最大绝对误差 (简称误差限) 为

$$d_{\text{max}} \leq a\% x_n \quad (2-16)$$

而用仪表测量的最大值相对误差为

$$E_{\text{rmax}} = \frac{d_{\text{max}}}{x} \leq a\% \frac{x_n}{x} \quad (2-17)$$

由上式可以看出, 某一被测量所能产生的最大示值相对误差, 不会超过仪表允许误差  $a\%$  乘以仪表测量上限  $x_n$  与测量值  $x$  的比。在实际测量中为可靠起见, 可用下式对仪表的测量误差进行估计, 即

$$E_r = a\% \frac{x_n}{x} \quad (2-18)$$

对于未给出准确度等级的仪表 (如天平等), 仪器的准确度用以下公式表示

$$\text{仪器的准确度} = \frac{0.5 \times \text{名义分度值}}{\text{量程的范围}} \quad (2-19)$$

式中, 名义分度值指测量仪表最小分度所代表的数值, 例如 TG-3284 型天平, 其名义分度值 (感量) 为 0.1mg, 测量范围为 0~200g, 则

$$\text{准确度} = \frac{0.5 \times 0.1}{(200-0) \times 10^3} = 2.5 \times 10^{-7} \quad (2-20)$$

若仪器的准确度已知, 也可用式(2-19) 求得其名义分度值。

使用这些仪器时, 测量的误差可用下式来确定

$$\text{绝对误差} \leq 0.5 \times \text{名义分度值}$$

$$\text{相对误差} \leq \frac{0.5 \times \text{名义分度值}}{\text{测量值}}$$

## 2.4 间接测量值的误差传递

在化工实验中, 每一个分析结果, 都是通过一系列的测量操作步骤获得的, 其中的每一个步骤发生的误差都会对分析结果产生影响, 称为误差的传递。误差传递包括系统误差的传递和偶然误差的传递。

已知测量值的误差, 如何计算分析结果的误差呢? 我们先推导误差传递的一般公式。

在间接测量中, 一般为多元函数, 而多元函数可用下式表示

$$y = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2-21)$$

式中  $y$ ——间接测量值;

$x_n$ ——直接测量值。

由台劳级数展开得

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (2-22)$$

或

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i$$

它的最大绝对误差为

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right| \quad (2-23)$$

式中  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ ——误差传递系数;

$\Delta x_i$ ——直接测量值的误差;

$\Delta y$ ——间接测量值的最大绝对误差。

函数的相对误差为

$$E_r = \frac{\Delta y}{y} = \frac{\partial f}{\partial x_1} \frac{\Delta x_1}{y} + \frac{\partial f}{\partial x_2} \frac{\Delta x_2}{y} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \frac{\Delta x_n}{y}$$

$$= \frac{\partial f}{\partial x_1} E_{r(1)} + \frac{\partial f}{\partial x_2} E_{r(2)} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} E_{r(n)} \quad (2-24)$$

式(2-23)和式(2-24)即为误差传递的一般公式。

### 2.4.1 系统误差的传递

#### (1) 加减运算

若  $R = A + B \pm C$ , 则  $R$  的最大绝对误差

$$dR = \left| \frac{\partial R}{\partial A} dA \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial B} dB \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial C} dC \right| \\ = dA + dB + dC \quad (2-25)$$

$dA$ 、 $dB$ 、 $dC$  为测量值  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的绝对误差。

即分析结果的绝对误差等于各测量值绝对误差的代数和。

#### (2) 乘除运算

设分析结果  $R$  是  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三个测量值相乘除的结果, 如计算式是  $R = \frac{AB}{C}$

$$dR = \left| \frac{\partial R}{\partial A} dA \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial B} dB \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial C} dC \right| \\ = \frac{B}{C} dA + \frac{A}{C} dB + \frac{AB}{C^2} dC$$

则得到  $\frac{dR}{R} = \frac{dA}{A} + \frac{dB}{B} + \frac{dC}{C}$  (2-26)

分析结果的相对误差, 是各测量步骤相对误差的代数和。

#### (3) 指数运算

如果分析结果  $R$  与测量值  $A$  有下列关系:  $R = mA^n$ , 则其误差传递关系式为

$$dR = \frac{\partial R}{\partial A} dA = mndA$$

两边同除  $R$ , 得

$$\frac{dR}{R} = n \frac{dA}{A} \quad (2-27)$$

即指数运算的相对误差, 为测量值的相对误差的指数倍。

#### (4) 对数关系

如果分析结果  $R$  与测量值  $A$  有如下关系:  $R = m \ln A$ , 则

$$dR = \frac{\partial R}{\partial A} dA = m \frac{dA}{A} \quad (2-28)$$

### 2.4.2 偶然误差的传递

#### (1) 加减运算

$R = aA + bB - cC + \dots$ , 则

$$\sigma_R^2 = a^2 \sigma_A^2 + b^2 \sigma_B^2 + c^2 \sigma_C^2$$

分析结果的标准误差的平方是各测量步骤标准误差的平方与系数平方乘积的总和。

#### (2) 乘除运算

设分析结果  $R$  是  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三个测量值相乘除的结果, 例如  $R = \frac{AB}{C}$ , 则

$$\left( \frac{\sigma_R}{R} \right)^2 = \left( \frac{\sigma_A}{A} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_B}{B} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_C}{C} \right)^2 \quad (2-29)$$



分析结果的相对标准误差的平方是各测量值相对标准误差的平方的总和。

(3) 指数运算

对于关系式为  $R = mA^n$ ，则

$$\left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 = n^2 \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2$$

或 
$$\frac{\sigma_R}{R} = n \frac{\sigma_A}{A} \quad (2-30)$$

分析结果的相对标准误差是测量值相对标准误差的  $n$  倍。

(4) 对数运算

对于关系式为  $R = m \ln A$ ，则

$$\left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 = m^2 \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 \quad (2-31)$$

或 
$$\sigma_R = m \frac{\sigma_A}{A}$$

误差传递公式见表 1-1。

表 1-1 误差传递公式

| 结果计算公式                              | 系统误差  | 偶然误差  |
|-------------------------------------|---|---|
| 一般式<br>$y = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ | $\Delta y = \sum_{i=1}^n \left  \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right $ | $E_r = \frac{\partial f}{\partial x_1} E_{r(1)} + \frac{\partial f}{\partial x_2} E_{r(2)} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} E_{r(n)}$  |
| 加减运算<br>$R = A + B \pm C$           | $dR = dA + dB + dC$   | $\sigma_R^2 = a^2 \sigma_A^2 + b^2 \sigma_B^2 + c^2 \sigma_C^2$   |
| 乘除运算<br>$R = \frac{AB}{C}$          | $\frac{dR}{R} = \frac{dA}{A} + \frac{dB}{B} + \frac{dC}{C}$                         | $\left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_C}{C}\right)^2$ |
| 指数运算<br>$R = mA^n$                  | $\frac{dR}{R} = n \frac{dA}{A}$   | $\frac{\sigma_R}{R} = n \frac{\sigma_A}{A}$   |
| 对数运算<br>$R = m \ln A$               | $dR = m \frac{dA}{A}$   | $\sigma_R = m \frac{\sigma_A}{A}$   |

## 2.5 误差分析应用

误差分析除了可以计算测量结果的精确度外，还可以对具体的实验设计预先进行误差分析，找到误差的主要来源及每一个因素所引起的误差大小，对实验方案和仪器选择提供依据。

**【例 2-1】** 干燥实验中，恒速干燥阶段物料表面与空气之间对流传热系数  $\alpha$  可按下式计算。

$$\alpha = \frac{U_C r_w}{t + t_w} = \frac{S \Delta \tau^r w}{t - t_w} = \frac{\Delta W r_w}{2ab \Delta \tau (t - t_w)}$$

式中  $\alpha$ ——恒速干燥段物料表面与空气之间对流传热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；

$U_C$ ——恒速干燥段的干燥速率， $kg/(m^2 \cdot s)$ ；

$t_w$ ——干燥器内空气的湿球温度， $^\circ C$ ；