

高等学校教材

化工原理实验 与 数据处理

—— 王存文 孙 炜 主 编 ——



化学工业出版社

高等学校教材

化工原理实验 与 数据处理

王存文 孙 炜 主 编
唐正姣 陈 文 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

T002-27
W2

本书第1章提出了学生做实验的基本要求,以便学生按照这些要求正确地进行实验。第2章介绍了实验误差的来源与分析。第3章对流体流动阻力的测定、离心泵特性曲线的测定、恒压过滤常数的测定、传热实验、填料塔吸收传质系数的测定、精馏实验、干燥实验等基本实验内容作了介绍,以便学生进行预习和操作。第4章介绍了运用计算机进行实验结果的数据处理,使学生明确造成实验误差的主要因素,掌握实验数据处理的方法。第5章对雷诺实验、流体机械能分布及转换、旋风分离器中气固流动现象、固体流态化、填料塔流体力学性能、板式塔操作状况、超滤膜分离7个演示实验作了介绍,以供学生在现场观察有关实验现象,加深对有关基本原理的理解。第6章介绍了实验室常用仪器的使用与维护,以便学生能正确使用和维护有关仪器。本书附录列有常用物性数据表和常见化工专业词汇和缩写中英文对照等内容。

本书可作为高等学校化学化工及相关专业的实验教材,亦可作为化工、材料、环境、生物工程、医药、机械、自动化信息控制等部门从事研究、设计与生产的工程技术人员的技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验与数据处理/王存文,孙炜主编. —北京:
化学工业出版社, 2008.5
高等学校教材
ISBN 978-7-122-02658-3

I. 化… II. ①王…②孙… III. ①化工原理-实验-高等学校-教材②化学工业-数据处理-高等学校-教材
IV. TQ02-33 TQ015

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 056902 号

责任编辑:徐雅妮 唐旭华
责任校对:李 林

文字编辑:王 琪
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:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张7½ 字数170千字 2008年8月北京第1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:15.00 元

版权所有 违者必究

前言

化工原理实验教学是化工原理课程教学的一个重要环节, 对学生加深和巩固掌握化工原理课程所阐述的基本原理, 培养学生分析和解决工程实际问题以及开展科学研究和创新能力均起着十分重要的作用。随着近年来化工原理教学实践和教学改革不断深入, 实验装置和手段不断更新提高, 计算机在实验数据处理方面应用广泛, 编写新的化工原理实验教材以适应新时期的教学要求成为必需。

本书根据武汉工程大学化工原理教研室教师多年的教学实践而编写, 并参考了国内外的教材。在该教研室组织编写的《化工原理实验》讲义基础上, 对原化工原理基本实验、演示实验内容进行了修订, 并新增加了化工原理实验须知、实验数据的计算机处理、实验室常用仪器的使用和维护及化工专业词汇和缩写中英文对照等内容。

本书是根据全国高校化工原理课程教学指导委员会提出的实验教学基本要求编写的。本书从化工实验研究的共性出发, 注重实验教材的实践性和单元操作的工程性, 在内容的编排取材上注重理论联系实际和运用实验方法论解决工程问题, 紧密结合计算机技术和软件的应用, 在实验数据处理中补充了 Excel 的函数功能及 Origin 应用软件的图形编辑处理及曲线拟合功能, 使本书更具有实用性和可读性。

本书以处理工程问题的实验研究方法为主线, 着重理论联系实际, 强调研究方法和工程观点的培养, 实用与理论兼顾。可作为高等学校化学化工及相关专业的实验教材, 亦可作为材料、环境、生物工程、医药、机械、自动化信息控制等部门从事研究、设计与生产的工程技术人员的技术参考书。

本书由王存文、孙炜主编, 唐正姣、陈文担任副主编, 参与编写的人员还有王为国、汪铁林、陈苏芳、李萍, 另外, 徐汶和张俊峰在整个教材的编写过程中也给予了大量帮助, 特此一并表示衷心的感谢。

由于编者学识水平有限, 经验不足, 不妥之处在所难免, 诚请读者批评指正。

编者

2008 年 3 月

实验 3 过滤实验	26
实验 4 传热实验	29
实验 4.1 强制湍流下空气-水对流给热系数的测定	29
实验 4.2 强制湍流下空气-蒸汽对流给热系数的测定	33
实验 5 氨吸收实验	36
实验 6 精馏实验	40
实验 6.1 全回流精馏实验	40
实验 6.2 部分回流精馏实验	43
实验 7 干燥实验	46
第 4 章 实验数据的计算机处理	50
4.1 用 Excel 处理化工原理实验数据	53

目 录

第 1 章 化工原理实验须知	1
1.1 化工原理实验的基本要求	1
1.1.1 化工原理实验的教学地位与教学目标	1
1.1.2 化工原理实验的实施过程及基本要求	1
1.1.3 化工原理实验预习报告和实验报告的基本内容	2
1.2 实验安全与环保要求	2
1.2.1 实验室安全操作规范	2
1.2.2 实验室安全事故处理	4
1.2.3 实验室环保操作规范	5
第 2 章 实验数据的处理	6
2.1 实验数据的误差	6
2.1.1 误差的基本概念	6
2.1.2 直接测量误差	9
2.1.3 函数误差	11
2.2 实验数据的处理	13
2.2.1 列表法、图示法、数学模型法简介	13
2.2.2 数学模型参数的求取	15
第 3 章 化工原理基本实验	20
实验 1 流体流动阻力的测定	20
实验 2 离心泵特性曲线的测定	23
实验 3 过滤实验	26
实验 4 传热实验	29
实验 4.1 强制湍流下空气-水对流给热系数的测定	29
实验 4.2 强制湍流下空气-蒸汽对流给热系数的测定	33
实验 5 氨吸收实验	36
实验 6 精馏实验	40
实验 6.1 全回流精馏实验	40
实验 6.2 部分回流精馏实验	43
实验 7 干燥实验	46
第 4 章 实验数据的计算机处理	50
4.1 用 Excel 处理化工原理实验数据	50

4.1.1	Excel 基础知识	50
4.1.2	Excel 处理基本化工原理实验数据示例	50
4.2	用 Origin 处理化工原理实验数据	68
4.2.1	用最小二乘法求取经验公式中的常数	68
4.2.2	双对数坐标图的绘制	71
4.2.3	一横轴多纵轴图的绘制	72
第 5 章	演示实验	74
实验 8	雷诺实验	74
实验 9	流体机械能转换演示实验	75
实验 10	旋风分离器实验	76
实验 11	固体流态化实验	77
实验 12	填料塔流体流动特性实验	78
实验 13	板式塔演示实验	79
实验 14	超滤膜分离实验	80
第 6 章	实验室常用仪器的使用与维护	81
6.1	压力测量	81
6.1.1	液柱压力计	81
6.1.2	弹簧式压力计	83
6.1.3	电测压力计	84
6.2	流量测量	85
6.2.1	测速管	85
6.2.2	孔板流量计	86
6.2.3	转子流量计	86
6.2.4	涡轮流量计	87
6.2.5	湿式气体流量计	88
6.3	温度测量	88
6.3.1	液体膨胀式温度计	88
6.3.2	热电阻温度计	89
6.3.3	热电偶温度计	90
6.3.4	温度控制	93
6.4	液体相对密度测量	93
6.4.1	工作原理	93
6.4.2	安装、调整、使用	93
6.4.3	维护保养	93
附录		94
附录一	水的重要物理性质 (101.3kPa)	94
附录二	空气的重要物理性质	94

附录三 乙醇-水溶液的物理常数(摘要)(101.3kPa)	95
附录四 乙醇-水溶液密度与组成的关系	95
附录五 乙醇-水混合液在常压下的气液平衡数据	96
附录六 乙醇-正丙醇在常压下的气液平衡数据	96
附录七 空气-水系统的焓-湿度图(总压 100kPa)	97
化工专业词汇(中英文对照)	98
化工常用缩写(中英文对照)	107
参考文献	112

1.1.1 化工原理实验的教学地位与教学目标

化工原理课程是化工、轻工、制药、环境等专业学生必修的一门专业基础课程,是综合技术学科化学工程与工艺的基础组成之一,也是学习后续专业课的基础。培养学生掌握各种常见化工单元操作的基本原理及典型设备的过程计算,培养工程观点和掌握常见工程处理方法。但复杂的化工生产过程常常都依赖于以实验为基础的经验或半经验公式,因此属于工程技术学科的化工原理也可以说是建立在实验基础上的学科。所以,化工原理实验在化工原理这门课程中占有重要地位,和化工原理理论课相辅相成,是化工教学中的重要组成部分,同时也是一门工程实验课程。

通过化工原理实验教学不仅使学生巩固了对化工基本原理的理解,更重要的是对学生进行了系统和严格的工程实验训练,使学生在实验中增长新知识,培养学生对实验现象敏锐的观察能力、运用各种实验手段正确获取实验数据的能力、分析归纳实验数据和实验现象的能力、由实验数据和实验现象得出结论并提出自己见解的能力、增强创新意识和提高分析与解决工程实际问题的能力。

通过化工原理实验教学,力求达到以下教学目标:

(1) 巩固、验证化工单元操作的基本理论和物性数据;并能运用理论分析实验过程,对实验结果得到进一步的理解和强化。

(2) 熟悉典型化工单元操作实验装置的流程、结构种操作,掌握化工原理的基本测试技术,同时培养学生运用所学的理论知识,分析和解决问题,提高学生从事实验研究的能力。

(3) 培养学生设计实验、组织实验的能力;增强工程概念,掌握实验的研究方法。

(4) 掌握数据处和分析的方法,并能完整地撰写实验报告。

(5) 培养学生实事求是、严肃认真的科学研究态度。

1.1.2 化工原理实验的实施过程及基本要求

由于化工原理实验设备较大,实验装置控制点(T 、 p 、 Q)较多,操作比较复杂,为了使每个实验都能达到预期的教学目的,使实验数据处理结果能够揭示过程的基本规律,要求学生必须以严谨的科学态度和实事求是的学风,独立钻研与分工协作相结合进行实验,具体要求如下。

(1) 根据实验安排,认真阅读实验教材的相关内容,弄清实验目的、原理和要求,写出实验预习报告。实验预习报告须经指导教师检查认可后,学生才能进行实验。

第1章 化工原理实验须知

1.1 化工原理实验的基本要求

1.1.1 化工原理实验的教学地位与教学目标

化工原理课程是化工、轻工、制药、环境等专业学生必修的一门专业基础课程，是综合性技术学科化学工程与工艺的基础组成之一，也是学习后续专业课的基础，培养学生掌握各种常见化工单元操作的基本原理及典型设备的过程计算、培养工程观点和掌握常见工程处理方法。但复杂的化工生产过程常常都依赖于以实验为基础的经验或半经验公式，因此属于工程技术学科的化工原理也可以说是建立在实验基础上的学科。所以，化工原理实验在化工原理这门课程中占有重要地位，和化工原理理论课相辅相成，是化工教学中的重要组成部分，同时也是一门工程实验课程。

通过化工原理实验教学不仅使学生巩固了对化工基本原理的理解，更重要的是对学生进行了系统和严格的工程实验训练，使学生在实验中增长新知识，培养学生对实验现象敏锐的观察能力、运用各种实验手段正确获取实验数据的能力、分析归纳实验数据和实验现象的能力、由实验数据和实验现象得出结论并提出自己见解的能力、增强创新意识和提高分析与解决工程实际问题的能力。

通过化工原理实验教学，力求达到以下教学目标。

- ① 巩固、验证化工单元操作的基本理论和相关规律，并能运用理论分析实验过程，使理论知识得到进一步的理解和强化。
- ② 熟悉典型化工单元操作实验装置的流程、结构和操作，掌握化工数据的基本测试技术，同时培养学生运用所学的基础理论知识，分析和解决问题，提高学生从事实验研究的能力。
- ③ 培养学生设计实验、组织实验的能力，增强工程概念，掌握实验的研究方法。
- ④ 掌握数据处理和分析的方法，并能完整地撰写实验报告。
- ⑤ 培养学生实事求是、严肃认真的科学研究态度。

1.1.2 化工原理实验的实施过程及基本要求

由于化工原理实验设备较大，实验装置控制点 (T, p, Q) 较多，操作比较复杂，为了使每个实验都能达到预期的教学目的，使实验数据处理结果能够揭示过程的基本规律，要求学生必须以严谨的科学态度和实事求是的学风，独立钻研与分工协作相结合进行实验。具体要求如下。

- ① 根据实验安排，认真阅读实验教材的相关内容，弄清实验目的、原理和要求，写出实验预习报告。实验预习报告须经指导教师检查认可后，学生才能进行实验。

② 对照实验装置和流程,熟悉实验操作步骤、设备构造、仪表使用方法和实验进行过程中的有关注意事项。

③ 根据实验操作条件,进一步确定待测参数的实验布点数目及其间距大小,做到严格准确。

④ 做好实验的组织工作,使之既有分工又有协作;既能保证实验质量,又能使每个学生得到全面训练。

⑤ 在实验过程中,应保持设备的启动和运转。实验数据尽可能在条件正常、过程稳定时读取,不仅要记录数值,而且还必须注明其单位,保证实验数据正确和可靠。若发现不正常情况,应立即报告指导教师。

⑥ 实验数据采集完毕,应交给指导教师检查,经教师同意方可停止实验。

⑦ 实验结束后,应检查水、电、气,将设备恢复原状,清理现场,并征得指导教师同意后才能离开实验室。

⑧ 认真计算和处理实验数据。

⑨ 实验报告是学生完成实验的最终书面总结,实验报告的格式和基本内容应当规范,并按要求填写。因此,实验报告既是对实验工作本身以及实验对象进行评价的主要依据,同时也是对学生今后撰写毕业论文、毕业设计和科研论文的一个基本训练,因此,学生必须独立完成实验报告。

1.1.3 化工原理实验预习报告和实验报告的基本内容

无论是实验预习报告还是实验报告,都应当做到:层次分明、观点正确、文理通顺、字迹清晰、图表规范、内容充实和可靠。

实验预习报告的内容包括:实验名称、实验目的、实验原理、实验装置及流程、实验操作要点、实验数据布点数目及间隔、原始数据记录表格的设计。

实验报告是实验工作结束之后,以实验数据的准确性和可靠性为基础,将实验结果整理成一份书面形式的材料。其部分内容与预习报告各项要求相同,其他内容还有:实验方法和操作步骤、实验数据处理(含实验数据处理的详细计算过程示例)、实验结果分析与讨论等。

1.2 实验安全与环保要求

1.2.1 实验室安全操作规范

1.2.1.1 电器仪表

① 进入实验室时,必须清楚总电闸、分电闸所在位置,并能够正确开启。

② 使用仪器时,应注意仪表的规格,所用的规格应满足实验的要求(如交流或直流电表、规格等),同时在使用时也要注意读数是否有连续性等。

③ 实验时不要随意接触连线处;不得随意拉拖电线;电动机、搅拌器转动时,勿使衣服、头发、手等卷入。

④ 实验结束后,关闭仪器和总电闸。

⑤ 电器设备维修时应停电作业。

⑥ 对使用高电压、大电流的实验,至少要有2~3人以上进行操作。

1.2.1.2 气瓶

① 领用高压气瓶(尤其是可燃、有毒的气体)应先通过感官和其他方法检查有无泄露,可用皂液(除氧气瓶不可用)等方法查漏。若有泄露不得使用。若使用中发生泄露,应先关紧阀门,再由专业人员处理。

② 开启或关闭气阀应缓慢进行,以保护稳压阀和仪表。操作者应侧对气体出口处,在减压阀与钢瓶接口处无泄露的情况下,应首先打开钢瓶阀,然后调节减压阀。关气时应先关闭钢瓶阀,放净减压阀中余气,再松开减压阀。

③ 钢瓶内气体不得用尽,压力达到1.5MPa时应调换新钢瓶。

④ 搬运或存放钢瓶时,瓶顶稳压阀应带阀保护帽,以防碰坏阀嘴。

⑤ 钢瓶放置应稳固,勿使之受震坠地。

⑥ 禁止把钢瓶放在热源附近,应距热源80cm以外,钢瓶温度不得超过50℃。

⑦ 可燃性气体(如氢气、液化石油气等)钢瓶附近严禁明火。

1.2.1.3 化学药品

一切药品瓶上都应粘贴标签;使用化学药品后立即盖好塞子并把药品放回原处;用牛角勺取固体药品或用量筒量取液体药品时,必须擦洗干净。在天平上称量固体药品时,应少取药品,并逐渐加到天平托盘上以免浪费。特别注意以下几类化学药品的使用。

(1) 腐蚀性化学药品

① 强酸对皮肤有腐蚀作用,且会损坏衣物,应特别小心。稀释硫酸时不可把水注入酸中,只能在搅拌下将浓硫酸慢慢地倒入水中。

② 量取浓酸或类似液体时,只能用量筒,不应用移液管量取。

③ 盛酸瓶用完后,应立即用水将盛酸瓶冲洗干净。

④ 若酸溅到了身体的某个部位,应用大量水冲洗。

⑤ 浓氨水及浓硝酸瓶启盖时应特别小心,最好以布或纸覆盖后再启盖。如在炎热的夏天必须先以冷水冷却。

⑥ 氢氧化钠、氢氧化钾、碳酸钠、碳酸钾等碱性试剂的贮瓶,不可用玻璃塞,只能用橡皮塞或软木塞。

(2) 有毒化学药品

① 大多数有机化合物有毒且易燃、易爆、易挥发,所以要注意实验室的通风。

② 使用有毒的化学药品或在操作中可能产生有毒气体的实验,必须在通风橱内进行。

③ 金属汞是一种剧毒的物质,吸入其蒸气会中毒。若长期吸入汞蒸气,可溶性的汞化合物会产生严重的急性中毒,故使用汞时不能把汞溅泼。如发现溅泼应立即收起,不能回收的应立即用硫黄覆盖。

(3) 危险化学药品

① 易燃和易爆的化学药品应贮存在远离建筑物的地方,贮存室内要备有灭火装置。

② 易燃液体在实验室里只能用瓶盛装且不得超过1L,否则就应当用金属容器类盛装;使用时周围不应有明火。

③ 蒸馏易燃液体时,最好不要用火直接加热,装料不得超过2/3,加热不可太快,避

免局部过热。

④ 易燃物质如酒精、苯、甲苯、乙醚、丙酮等在实验桌上临时使用或暂时放在桌上的，都不能超过 500mL，并且应远离电炉和一切热源。

⑤ 在明火附近不得用可燃性热溶剂来清洗仪器，应用没有自燃危险的清洗剂来洗涤，或移到没有明火的地方去洗涤。

⑥ 乙醚长期存放后，常会含过氧化物，故蒸馏乙醚时不能完全蒸干，应剩余 1/5 体积的乙醚，以免爆炸。

⑦ 避免金属钠和水接触，钠必须存放在无水的煤油中。

1.2.1.4 火灾预防

① 在火焰、电加热器或其他热源附近严禁放置易燃物，工作完毕，立即关闭所有热源。

② 灼热的物品不能直接放在实验台上。倾斜或使用易燃物时，附近不得有明火。

③ 在蒸发、蒸馏或加热回流易燃液体过程中，实验人员绝对不许擅自离开。不许用明火直接加热，应根据沸点高低分别用水浴、砂浴或油浴加热，并注意室内通风。

④ 如不慎将易燃物倾倒在实验台或地面上，应迅速切断附近的电炉、喷灯等加热源，并用毛巾或抹布将流出的易燃液体吸干，室内立即通风、换气。身上或手上若沾上易燃物时，应立即清洗干净，不得靠近火源。

1.2.2 实验室安全事故处理

在实验操作过程中，总会不可避免地发生危险事故，如火灾、触电、中毒及其他意外事故。为了及时防止事故进一步扩大，在紧急情况下，应立即采取果断有效的措施。

(1) 割伤

取出伤口中的玻璃碎片或其他固体物，然后抹上红药水并包扎。

(2) 烫伤

切勿用水冲洗，轻伤涂以烫伤油膏、玉树油、鞣酸油膏或黄色的苦味酸溶液；重伤涂以烫伤油膏后立即去医院治疗。

(3) 试剂灼伤

被酸（或碱）灼伤，应立即用大量水冲洗，然后相应地用饱和碳酸氢钠溶液或 2% 乙酸溶液冲洗，最后再用水冲洗。严重时要消毒，拭干后涂以烫伤油膏。

(4) 酸（碱）溅入眼内

立即用大量水冲洗，然后相应地用 1% 碳酸氢钠溶液或硼酸溶液冲洗，最后再用水冲洗。溴水溅入眼内的处理方法相同。

(5) 吸入刺激性或有毒气体

立即到室外呼吸新鲜空气。如有昏迷休克、虚脱或呼吸机能不全者，可人工呼吸，可能时给予氧气和浓茶、咖啡等。

(6) 毒物进入口内

① 腐蚀性毒物。对于强酸或强碱，先饮大量水，然后相应服用氢氧化铝膏、鸡蛋白或醋、酸果汁，再给以牛奶灌注。

② 刺激剂及神经性毒物。先给以适量牛奶或鸡蛋白使之立即冲淡缓和，再给以

15%~25%硫酸铜溶液内服,并用手指伸入咽喉部促使呕吐,然后立即送往医院。

(7) 触电

① 应立即拉下电闸,切断电源,使触电者脱离电源。或戴上橡皮手套、穿上胶底鞋或踏干燥木板绝缘后将触电者从电源上拉开。

② 将触电者移至适当地方,解开衣服,必要时进行人工呼吸及心脏按摩。并立即找医生处理。

(8) 火灾

① 如一旦发生了火灾,应保持沉着镇静,首先切断电源,熄灭所有加热设备,移出附近的可燃物;关闭通风装置,减少空气流通,防止火势蔓延。同时尽快拨打“119”求救。

② 要根据起因和火势选用适当的方法。一般的小火可用湿布、石棉布或沙子覆盖燃烧物即可熄灭,火势较大时应根据具体情况采用下列灭火器。

a. 四氯化碳灭火器。用于扑灭电器内或电器附近着火,但不能在狭小的通风不良的室内使用(因为四氯化碳在高温时将生成剧毒的光气)。使用时只需开启开关,四氯化碳即会从喷嘴喷出。

b. 二氧化碳灭火器。适用性较广,使用时应注意,一手提灭火器,一手应握在喇叭筒的把手上,而不能握在喇叭筒上(否则易被冻伤)。

c. 泡沫灭火器。火势大时使用,非大火时通常不用,因事后处理较麻烦。使用时将筒身颠倒即可喷出大量二氧化碳泡沫。

无论使用何种灭火器,皆应从火的四周开始向中心扑灭。若身上的衣服着火,切勿奔跑,赶快脱下衣服;或用厚的外衣包裹使火熄灭;或用石棉布覆盖着火处;或就地卧倒打滚;或打开附近的自来水冲淋使火熄灭。严重者应躺在地上(以免火焰向头部)用防火毯紧紧包住直至火熄灭。烧伤较重者,立即送往医院。若个人力量无法有效地阻止事故进一步发展,应该立即报告消防队。

1.2.3 实验室环保操作规范

① 处理废液、废物时,一般要戴上防护眼镜和橡皮手套,有时要穿防毒服装。处理有刺激性和挥发性废液时,要戴上防毒面具在通风橱内进行。

② 接触过有毒物质的器皿、滤纸等要收集后集中处理。

③ 废液应根据物质性质的不同分别集中在废液桶内,贴上标签,以便处理。在集中废液时要注意,有些废液不可以混合,如过氧化物和有机物、盐酸等挥发性酸与不挥发性酸、铵盐及挥发性胺与碱等。

④ 实验室内严禁吃食品,离开实验室要洗手,如面部或身体被污染必须清洗。

⑤ 实验室内须采用通风、排毒、隔离等安全环保防范措施。

第2章 实验数据的处理

化工原理实验是化工原理课程的一个重要教学环节。实验数据是否准确可靠是实验者最关心的问题之一。由于种种原因,实验数据必然存在误差。初学者应了解什么是误差,怎样计算测量误差。学会分析误差产生的原因,以改进实验方案。正确处理实验数据,在允许的误差范围内由实验数据得出科学的结论,为进一步建立数学模型、解决工程问题提供依据。

进行实验数据的误差分析与数据处理时要应用概率论和统计学原理。本章只介绍一些基础知识,不进行严格的数学推导,重在应用。

2.1 实验数据的误差

本节主要讨论误差的基本概念、直接测量误差及函数误差。

2.1.1 误差的基本概念

2.1.1.1 误差的来源

测量值与真值之差称为误差。误差按其来源可分为三类:过失误差、系统误差和随机误差。

过失误差是由于实验者工作不熟练或粗心大意造成的。如操作错误、读数错误等。这类误差通常与正常值相差较大,整理数据时应予以剔除。

系统误差是指在同一条件下多次测量时,误差的绝对值或符号保持恒定,或者在条件改变时误差按某一确定规律变化。仪器不准确,如零点未校准;实验者的习惯与偏向使读数偏高或偏低;测量环境,如压力、温度偏离校准值等都会造成系统误差。这类误差有规律可循,通过精心校正或检查可以消除。

随机误差是指在相同条件下多次测量同一量时,误差的绝对值和符号各不相同,没有确定的规律,也不可预计,但有抵消性的误差。这类误差是由随机因素产生的,遵循统计规律。

排除过失误差及系统误差的误差应为随机误差。本节主要讨论随机误差。

2.1.1.2 误差的常用表示法

(1) 真值的定义

对某一物理量进行无限多次重复测量,各次测量的算术平均值称为测量值的数学期望或称为真值。本章中真值记为 x^* 。

对有限次测量,将其算术平均值当作真值的最佳近似值,简称最佳值,记为 $\bar{x}$ 。测量次数越多,最佳值越接近于真值。

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

式中 x_i ——第 i 次测量值;

n ——测量次数。

(2) 绝对误差与相对误差

① 绝对误差 δ_i 与 δ

$$\delta_i = x_i - x^* \approx x_i - \bar{x} \quad (2-2)$$

$$\delta = \sum_{i=1}^n \frac{|\delta_i|}{n} \quad (2-3)$$

式中, δ_i 取绝对值是为了防止正负误差相互抵消。虽然取绝对值后求和夸大了测量误差, 但因其计算简便, 故较为常用。 δ 又称为算术平均误差。

② 相对误差 e

$$e = \frac{\delta}{x^*} \approx \frac{\delta}{\bar{x}} \quad (2-4)$$

(3) 方差与标准差

算术平均误差不能反映误差的离散程度或偏离平均值的程度。例如, 有下述两组误差:

3, 1, 8, 2, 1

4, 1, 3, 5, 2

由式(2-3)计算可知, 这两组数据的算术平均误差均为 3, 但第一组数据中最大误差为 8, 远高于平均值 3。第二组数据中最大误差为 5, 较第一组数据最大误差要小。这两组数据差异可以用方差与标准差判别。

方差定义为随机变量与其数学期望之差的平方和的平均值。测量误差的方差为:

$$\delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x^*)^2}{n} \quad (2-5)$$

标准差 σ 又称均方差, 定义为:

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

对有限次测量, 以 $\bar{x}$ 代替 x^* , 可推导出标准差的估计值 $\hat{\sigma}$:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}{n-1}} \quad (2-7)$$

式中, ϵ_i 为残差。

$$\epsilon_i = x_i - \bar{x} \quad (2-8)$$

式(2-7)中若 $\sum \epsilon_i^2$ 按下式计算, 则可减少计算量。

$$\sum \epsilon_i^2 = \sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2 = \sum x_i^2 - \bar{x} \sum x_i \quad (2-9)$$

由式(2-7)求得前述两组数据的标准差 $\sigma_1 = 4.04$, $\sigma_2 = 3.71$ 。可见由标准差可以反映数据的离散程度。

2.1.1.3 随机误差的分布

在化学工程问题中,大量随机误差服从或近似服从正态分布,其分布规律如图 2-1 所示。图中,横坐标表示测量值 x (或绝对误差 δ);纵坐标表示概率密度函数 $p(x)$ [或 $p(\delta)$]。图中倒钟形曲线为某一标准差下的概率曲线。它对称于直线 $x = x^*$ (测量值 x 的数学期望) 或对称于直线 $\delta = 0$ 。

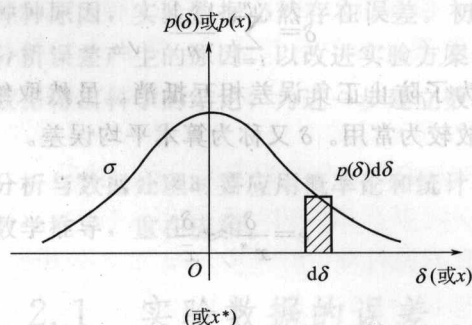


图 2-1 正态分布曲线

正态分布密度函数为:

$$p(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (|\delta| < \infty) \quad (2-10)$$

曲线下阴影区的面积 $p(\delta) d\delta$ 为误差 δ 出现的概率,曲线下的全部面积表示全部误差出现的概率,应为 100%。测量误差 δ 落在区间 $[-\Delta, +\Delta]$ 内的概率为:

$$p(-\Delta \leq \delta \leq +\Delta) = \int_{-\Delta}^{+\Delta} p(\delta) d\delta \quad (2-11)$$

概率积分的运算较复杂,通常由概率积分表查积分值。

2.1.1.4 置信概率 ξ 与显著性水平 α

若将误差以标准差的倍数表示,令 $\Delta = z\sigma$,则式(2-11)可理解为“误差落在区间 $[-z\sigma, +z\sigma]$ 内”这一假设成立的概率,称为置信概率,记为 ξ 。若令 $\alpha = 1 - \xi$,则 α 表示上述假设不成立或有显著错误的概率。 α 称为置信水平或显著性水平。 z 称为置信系数。

若误差服从正态分布,则可根据需要选取一个置信系数 z ,由正态分布概率表查出对应的概率。反之,若选取置信水平 α ,也可由正态分布概率表查出对应的置信系数 z ,确定某一 α 下的误差范围 $\pm z\sigma$ 。表 2-1 列举了几组 α 、 ξ 、 z 值。

表 2-1 α 、 ξ 、 z 的关系

置信水平 $\alpha/\%$	置信概率 $\xi/\%$	置信系数 z
31.80	68.20	1
5	95	1.96
4.55	95.45	2
1	99	2.58
0.27	99.73	3

2.1.2 直接测量误差

2.1.2.1 直接测量误差的计算

本节只讨论等精度直接测量误差的计算。

精度定义为标准差的倒数。标准差越小，数据的离散程度越小，精度越高，如图 2-2 所示。

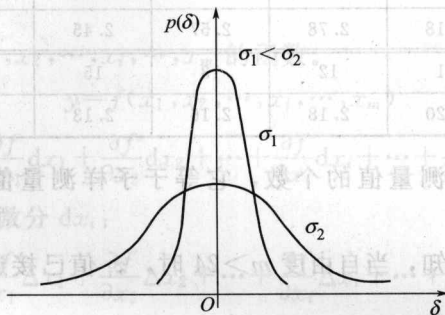


图 2-2 σ 与数据的离散程度

在等精度测量中，各次测量的标准差相同。

不等精度测量指仪器、测量方法等测量条件不同，因此各次测量的可靠程度不同，应采用加权平均值计算。

等精度直接测量可用绝对误差、相对误差或标准差表示。

(1) 用绝对误差或相对误差表示

$$x^* = \bar{x} \pm \delta \quad (2-12)$$

$$x^* = \bar{x} (1 \pm e) \quad (2-13)$$

(2) 用标准差表示

① 若已知标准差 σ ，则一次测量值 x 的测量结果为：

$$x^* = x \pm \sigma \quad (2-14)$$

若显著性水平 $\alpha = 5\%$ ，由表 2-1 查得置信系数 $z = 1.96$ ，则 $x^* = x \pm 1.96\sigma$ 的置信概率为 95%，此结果有显著错误的概率为 5%。

② 若对同一物理量进行 n 次等精度测量，则：

$$x^* = \bar{x} \pm z\sigma_{\bar{x}} \quad (2-15)$$

式中， $\sigma_{\bar{x}}$ 称为算术平均值的标准差，按下式计算：

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2-16)$$

【例 2-1】 已知某仪器的标准差为 12%，若要求 $\sigma_{\bar{x}} = 5\%$ 及 1%，应进行多少次测量？

解 由式(2-16)，当 $\sigma_{\bar{x}} = 5\%$ 时， $n = (\sigma/\sigma_{\bar{x}})^2 = (12/5)^2 = 5.8$ 次；同理 $\sigma_{\bar{x}} = 1\%$ 时， $n = 144$ 次。

③ 已知有限次测量标准差的估计值 $\hat{\sigma}$ ，测量结果可表示为：

由式(2-7)求得前述两组数据的 $x^* = \bar{x} \pm z_i \hat{\sigma}_{\bar{x}}$, $\sigma_2 = 3.71$, 可见由标准差可 (2-17)

其中

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \quad (2-18)$$

由于测量次数较少, 不服从正态分布, 式(2-17)中 z_i 查 t 分布表, 见表 2-2。

表 2-2 $\alpha=5\%$ 时的 z_i 值

自由度 m	2	3	4	5	6	7	8	9
z_i	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.37	2.31	2.26
自由度 m	10	11	12	13	15	19	24	8
z_i	2.23	2.20	2.18	2.16	2.13	2.09	2.06	1.96

表中的自由度指独立测量值的个数, 它等于子样测量值个数减去约束条件(方程)数。

比较表 2-1 与表 2-2 可知, 当自由度 $m > 24$ 时, z_i 值已接近正态分布。当 $m \rightarrow \infty$ 时, $z_i = 1.96$, 与正态分布一致。

2.1.2.2 3σ 准则

3σ 准则是指可疑测量值能否剔除的一种判据。由表 2-1 知, 若 $z=3$, 则 $\alpha=0.27\%$ 。说明大于或等于 3σ 的误差出现的概率只有 0.27% , 即 367 次测量中出现这种情况的概率只有一次。因此, 将大于或等于 $\pm 3\sigma$ 的误差当作过失误差剔除, 产生“弃真错误”的概率只有 0.27% 。

当测量次数 $n \leq 10$ 时, 3σ 准则不适用。当 $n \geq 11$ 时, 应用 3σ 准则剔除可疑测量值产生的弃真概率见表 2-3。

表 2-3 3σ 准则的弃真概率

测量次数 n	11	16	61	121	333
弃真概率/%	1.9	1.1	0.5	0.4	0.3

2.1.2.3 直接测量误差的估计

若测量次数较少或只测量一次, 则可参考以下方法估计测量误差。

(1) 用标准仪表校正

例如, 用伏特表测得电压为 203V, 用高一级的伏特表测量值为 200V, 则校正值为 3V。

(2) 按仪表的精度等级或引用误差估计

$$\text{引用误差} = \frac{\text{示值误差}}{\text{满度误差}} \times 100\% \quad (2-19)$$

例如, 某压力表的满度示值即最大量程为 0.4MPa, 精度为 1.5 级, 表示该表的引用误差为 1.5%。因此, 该表的最大示值误差为:

$$\delta_{\max} = \frac{1.5}{100} \times 0.4 = 0.006 \text{MPa}$$

(3) 取仪表最小分度的一半为绝对误差

若温度计示值在 51~52℃ 之间, 则可记为 $(51 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。