



化学工程与工艺应用型本科建设系列教材

普通高等教育“十三五”规划教材

化学工程与工艺专业实验

HUAXUE GONGCHENG YU GONGYI ZHUANYE SHIYAN

姚跃良 主编



化学工业出版社



化学工程与工艺应用型本科建设系列教材

普通高等教育“十三五”规划教材

化学工程与工艺专业实验

HUAXUE GONGCHENG YU GONGYI ZHUANYE SHIYAN

姚跃良 主编

蔺华林 韩生 毛海舫 李俊 王朝阳 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《化学工程与工艺专业实验》是根据应用型本科人才培养目标编写的专业实验教材。全书共分五章,包括:化工实验基本常识、实验数据处理与实验方案设计、化工基本物理量的测量、化工实验过程中常用检测方法、化学工程与工艺专业实验 14 个实验项目。每个实验后均附有若干思考题,便于学生预习及复习。

《化学工程与工艺专业实验》可作为高等学校化学工程与工艺专业的实验教材,中本贯通教育本科阶段的实验教材,也可供从事化工专业研究、科技开发、管理和生产人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化学工程与工艺专业实验/姚跃良主编. —北京:化学工业出版社, 2019.5
化学工程与工艺应用型本科建设系列教材 普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-122-33572-2

I. ①化… II. ①姚… III. ①化学工程-化学实验-高等学校-教材 IV. ①TQ016

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 302838 号

责任编辑:刘俊之

文字编辑:林丹

责任校对:宋玮

装帧设计:韩飞

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)

印刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张7 $\frac{3}{4}$ 字数189千字 2019年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888 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:29.00元

版权所有 违者必究

前 言

《化学工程与工艺专业实验》是根据应用型本科人才培养目标和中本贯通教育的特点编写的专业实验教材。工程实践能力的培养是应用型人才培养体系中的重要内容。化学工程与工艺专业实验是为培养和提高学生实验研究能力、工程设计能力、工程实践能力和创新能力而设立的一门课程。它以化学工程与工艺的专业课（化工热力学、化学反应工程、分离工程等）为理论基础，与化工原理实验、毕业论文（设计）等形成完整的工程实验实践教学环节。全书内容共分五章，包括：化工实验基本常识、实验数据处理与实验方案设计、化工基本物理量的测量、化工实验过程中常用检测方法、化学工程与工艺专业实验。化学工程与工艺专业实验包括化工热力学基础数据测试、反应工程、分离工程及化工工艺等相关的典型实验，比较详细地描述了实验原理、实验步骤、数据处理方法及过程等；部分实验内容结合本校教师的科研项目，注重实验项目的综合性，综合运用反应工程、分离工程和化学工艺学的知识，强调实验设计的方法论，使学生的科研能力、创新能力的培养贯穿于整个实验过程。

本教材由姚跃良组织编写并担任主编。第1章由姚跃良编写，第2章由姚跃良、王朝阳编写，第3章由姚跃良、韩生编写，第4章由姚跃良、蔺华林编写，第5章由毛海舫、蔺华林、李俊、刘为民、王朝阳、姚跃良编写。

本教材的编写得到了上海市应用型本科化学工程与工艺专业建设项目的资助，在此表示感谢。

本教材在编写过程中，编者参考了国内部分最新出版的化学工程与工艺专业实验教材和相关文献，在此向相关作者表示感谢。由于编者水平有限，书中难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

编者

2018年10月

目 录

第 1 章 化工实验基本常识

1

- 1.1 实验室消防知识与安全用电 1
 - 1.1.1 实验室防火 1
 - 1.1.2 实验室防爆 2
 - 1.1.3 安全用电常识 2
- 1.2 实验室环保知识 3
- 1.3 实验室常见事故的处理方法 3
- 1.4 实验室一般注意事项 4
- 1.5 实验要求 4

第 2 章 实验数据处理与实验方案设计

6

- 2.1 实验与测量 6
- 2.2 误差的基本概念 6
 - 2.2.1 误差的来源及分类 6
 - 2.2.2 实验数据的真值与平均值 7
 - 2.2.3 误差的表示方法 8
 - 2.2.4 精密度、正确度和精确度 8
- 2.3 实验数据的有效数与记数法 9
 - 2.3.1 有效数字 9
 - 2.3.2 科学记数法 9
 - 2.3.3 有效数字运算规则 9
- 2.4 实验数据处理的基本方法 11
 - 2.4.1 列表法 11
 - 2.4.2 图示法 13
 - 2.4.3 回归分析法 13
- 2.5 实验设计 15
 - 2.5.1 析因设计法 15
 - 2.5.2 正交试验设计法 15

3.1 温度的测量及控制	20
3.1.1 温标	20
3.1.2 水银温度计	21
3.1.3 贝克曼 (Beckmann) 温度计	22
3.1.4 其他液体温度计	23
3.1.5 热电偶温度计	23
3.1.6 热电阻温度计	27
3.1.7 恒温技术及装置	29
3.2 压力的检测及变送	32
3.2.1 常用压力检测仪表	32
3.2.2 压力检测仪表的选用	37
3.2.3 压力检测仪表的安装注意事项	37
3.3 流量的测量与变送	38
3.3.1 差压式流量计	39
3.3.2 转子流量计	41
3.3.3 旋涡流量计 (涡街流量计)	43
3.3.4 涡轮流量计	43
3.3.5 电磁流量计	44
3.3.6 椭圆齿轮流量计 (容积式)	45

4.1 薄层色谱	46
4.1.1 制板	47
4.1.2 上样	48
4.1.3 展开	49
4.1.4 定位和显色	49
4.2 气相色谱	51
4.2.1 气相色谱分析方法概述	51
4.2.2 基本原理	52
4.2.3 气相色谱定性和定量方法	53
4.3 高效液相色谱法	55
4.3.1 HPLC 的特点	55
4.3.2 高效液相色谱仪的组成	56
4.3.3 高效液相色谱法的主要类型及其分离原理	57
4.4 熔点测定	59
4.4.1 固-液相平衡与熔点	59

4.4.2	熔点测定的应用	59
4.4.3	熔点测定方法	60
4.5	分光光度法	61
4.5.1	基本原理	61
4.5.2	分光光度计基本结构简介	62
4.5.3	分光光度计的基本应用	63

第5章 化学工程与工艺专业实验

64

实验 1	恒沸精馏	64
实验 2	填料塔分离效率的测定	69
实验 3	固膜分离	73
实验 4	一氧化碳中温-低温串联变换反应	77
实验 5	乙苯脱氢制苯乙烯	81
实验 6	催化反应精馏法制甲缩醛	85
实验 7	微反应器连续制备超细碳酸钙	89
实验 8	管式循环反应器停留时间分布的测定	94
实验 9	二元系统汽液平衡数据的测定	97
实验 10	海盐精制	102
实验 11	熔融结晶法提纯愈创木酚	106
实验 12	催化剂载体——活性氧化铝的制备	108
实验 13	催化剂载体孔隙率及吸水率的测定	113
实验 14	负载型 Pd 系催化剂的制备及液相加氢催化 反应	115

参考文献

118

第 1 章 化工实验基本常识

化工实验室中经常使用的化学试剂和溶剂大多数都易燃易爆有腐蚀性，而且具有一定的毒性。因此，防火、防爆、防中毒、防烧伤等已成为化工实验中的重要课题。同时，化工实验中所用的仪器有些是玻璃制品，正确使用玻璃仪器，防止意外发生，也尤为重要。并且在实验过程中，经常要使用电器，因此，注意安全用电也非常重要。在化工实验过程中，只要重视安全问题，严格遵守实验操作规程，强化安全措施，就能有效防止事故的发生，使实验安全正常地进行。下面介绍几种实验室事故的预防和处理方法。

1.1 实验室消防知识与安全用电

1.1.1 实验室防火

实验室防火工作应以预防为主，杜绝火灾隐患。下面具体介绍着火原因及消防知识。

(1) 着火原因

可燃物质（一切可氧化的物质）、助燃物质（氧化剂）和火源（能够提供一定的温度或能量），是可燃物质燃烧的三个基本要素。着火是化工实验常见事故之一，引起着火的原因很多，其中绝大多数是不按操作规程进行实验造成的，如用敞口容器加热低沸点的溶剂、加热方法不正确等，均可引起着火。因此实验必须严格按操作规程进行。

(2) 实验室常用的消防器材

应该知道实验室内各种灭火器材的存放位置，并熟悉其使用方法，一旦发生火灾时可迅速使用。按实验室应急预案进行处置，立即报警（火警电话为 119），防止灾情扩大。

① 灭火砂箱 用于扑灭易燃液体和其他不能用水灭火的危险品引起的火灾。砂子能隔断空气并起到降温作用从而灭火，但砂中不能混有可燃性杂物，并且要保持干燥。由于砂箱中存砂有限，故只能扑灭局部小规模的火源；大规模火源，可用不燃性固体粉末扑灭。

② 石棉布、毛毡或湿布、灭火毯 用于扑灭火源区域不大的火灾，也是扑灭衣服着火的常用方法，通过隔绝空气来达到灭火的目的。

③ 泡沫灭火器 实验室多使用手提式泡沫灭火器，外壳用薄钢板制成，内有一个盛有硫酸铝的玻璃胆，胆外装有碳酸氢钠和发泡剂（甘草精）。使用时把灭火器倒置，马上发生

化学反应，生成含 CO_2 的泡沫，泡沫黏附在燃烧物体的表面，形成与空气隔绝的薄层而灭火。适用于扑灭实验室的一般火灾，但泡沫导电，故不能用于扑救电器设备和电线的火灾。

④ 其他灭火器材

- a. 四氯化碳灭火器，适用于扑灭电器设备火灾。
- b. 二氧化碳灭火器，使用时能降低空气中的含氧量，因此要注意防止现场人员发生窒息。
- c. 干粉灭火器，可扑灭易燃液体、气体、带电设备引起的火灾。
- d. 1211 灭火器，适用于扑救油类、电器类、精密仪器等火灾。

1.1.2 实验室防爆

(1) 化工实验室爆炸事故的两种情况

① 某些化合物容易发生爆炸，如过氧化物、芳香族硝基化合物等，在受热或受到碰撞时，均会发生爆炸。含过氧化物的乙醚在蒸馏时，也有爆炸的危险。乙醇在和浓硝酸混合时，也会引起极强烈的爆炸。

② 仪器安装不正确或操作不当时，也会引起爆炸。如蒸馏或反应时实验装置被堵塞，减压蒸馏时使用不耐压的仪器等。

(2) 爆炸事故的预防

- ① 使用易燃易爆物品时，应严格按照操作规程操作，要特别小心。
- ② 易爆固体的残渣必须按照规定的流程进行处置。
- ③ 反应过于猛烈时，应当控制加料速度和反应温度，必要时采取冷却措施。
- ④ 在用玻璃仪器组装实验装置之前，要先检查玻璃仪器是否破损。
- ⑤ 常压操作时，不能在密闭体系内进行加热或反应，要经常检查反应装置是否被堵塞；如发现被堵塞，应停止加热或反应，将堵塞排除后再继续加热或反应。
- ⑥ 减压蒸馏时，仪器必须耐压（不能用平底烧瓶、锥形瓶、薄壁试管等不耐压容器作为接收器或反应器）。
- ⑦ 常压蒸馏（含）减压蒸馏，均不能将被蒸液体蒸干，以免局部过热或产生过氧化物而发生爆炸。

(3) 爆炸事故处理

爆炸事故应以预防为主，一旦发生爆炸危险，按实验室应急预案进行处置，保持镇静，根据险情进行排除或及时报警。

1.1.3 安全用电常识

电对人的伤害可分为内伤与外伤两种，可单独发生，也可同时发生。

(1) 电伤危险因素

电流通过人体某一部分即为触电。触电是最直接的电气事故，常常是致命的。其伤害程度与电流强度的大小、触电时间以及人体电阻等因素有关。

实验室常用电压为 220~380V、频率为 50Hz 的交流电，人体的心脏每跳动一次大约有 0.1~0.2s 的间歇时间，此时对电流最敏感，电流流过人体脊柱和心脏时危害极大。

人体电阻分为皮肤电阻（潮湿时约为 2000 Ω ，干燥时约为 5000 Ω ）和体内电阻（150~

500 Ω)。随着电压升高,人体电阻相应降低。触电时,因为皮肤破裂而使人体电阻骤然降低,通过人体的电流随之增大而危及人的生命。

(2) 防止触电注意事项

- ① 电气设备要可靠接地,对220V的二相电源,应使用带有接地线的三芯插座。
- ② 一般不要带电进行电器维修操作。特殊情况需要时,必须穿绝缘胶鞋,戴橡皮手套等防护用具。
- ③ 安装漏电保护装置。一般规定其动作电流不超过30mA,切断电源时间低于0.1s。
- ④ 实验室严禁随意拖拉电线。

1.2 实验室环保知识

实验室排放的废液、废气、废渣等虽然数量不大,但不经必要的处理直接排放,会对环境和人身造成危害。要特别注意以下几点。

- ① 实验室所有药品以及中间产品,必须贴上标签,注明名称,防止误用和因情况不明而处理不当造成事故。
- ② 绝对不允许用嘴去吸移液管液体以获取各种化学试剂和溶液,应使用洗耳球等吸取。
- ③ 处理有毒或刺激性物质时,必须在通风橱内进行,防止散逸到室内。
- ④ 废液应根据物质性质的不同分别集中在废液桶内,并贴上标签,以便处理(有些废液不可混合,如过氧化物和有机物、盐酸等挥发性酸和不挥发性酸、铵盐及挥发性胺与碱等)。
- ⑤ 接触过有毒物质的器皿、滤纸、容器等要分类收集后集中处理。
- ⑥ 处理废液、废物时,一般要戴上防护眼镜和橡皮手套。处理兼有刺激性、挥发性的废液时,要戴上防毒面具,在通风橱内进行。

1.3 实验室常见事故的处理方法

(1) 玻璃割伤

如果为一般轻伤,应及时挤出污血,并用消毒过的镊子取出玻璃碎片,用蒸馏水洗净伤口,涂上碘酒或红汞水,再用绷带包扎;如果为大伤口,应立即用绷带扎紧伤口上部,使伤口停止出血,立即送医院。

(2) 酸液或碱液溅入眼中

酸液或碱液溅入眼中应立即用大量水冲洗(进入实验室应注意洗眼器安装位置)。若为酸液,再用质量分数为1%的碳酸氢钠溶液冲洗;若为碱液,则再用质量分数为1%的硼酸溶液冲洗。最后用水洗。重伤者经初步处理后,立即送医院。

(3) 溴液溅入眼中

溴液溅入眼中按酸液溅入眼中事故作急救处理后,立即送医院。

(4) 皮肤被酸、碱或溴液灼伤

被酸或碱液灼伤时,伤处首先用大量水冲洗。若为酸液灼伤,再用饱和碳酸氢钠溶液洗;若为碱液灼伤,则再用质量分数为1%的醋酸洗。最后都用水洗,再涂上凡士林药膏。

被溴液灼伤时，伤处立刻用石油醚冲洗，再用质量分数为2%的硫代硫酸钠溶液洗，然后用蘸有油的棉花擦，再敷以油膏。

1.4 实验室一般注意事项

- ① 遵守实验室的各项规章制度，听从教师的指导，尊重实验室工作人员的职权。
- ② 学生在进入实验室时要注意观察有关安全通道，以便在发生意外事故能及时有效疏散。
- ③ 保持实验室的整洁。在整个实验过程中，保持桌面和仪器的整洁，保持水槽干净；实验期间严禁烟火。
- ④ 不得将废液等倒入水槽。
- ⑤ 公用仪器和工具在指定地点使用，公用药品不能任意挪动，要爱护仪器，节约药品。
- ⑥ 在实验室内外均备有灭火设备，学生应注意保护，不准随意挪位。
- ⑦ 实验完毕离开实验室时，应关闭水、电、气体、门、窗等。

1.5 实验要求

为了保证实验的顺利进行，以达到预期的目的，要求学生必须做到如下几点。

(1) 充分预习

实验前要做好预习，并查阅有关手册和参考资料，掌握原料和产品的物性数据，了解实验原理和步骤。

实验预习报告的内容包括：

- ① 实验目的，写出本次实验要达到的主要目的；
- ② 实验原理，写出主、副反应式及反应机理、简单叙述操作原理；
- ③ 实验装置图，画出主要反应装置图，并标明仪器名称；
- ④ 主要试剂及产物物理常数；
- ⑤ 主要试剂的用量及规格；
- ⑥ 实验步骤，画出反应及产品分离纯化过程的流程图；
- ⑦ 回答问题。

(2) 认真操作

实验时要认真操作，仔细观察各种现象，积极思考，注意安全，保持整洁。不得脱岗。

(3) 做好记录

实验过程中，要及时、准确地记录实验现象和数据，以便对实验现象做出分析和解释。切不可在实验结束后补写实验记录。

实验记录的内容包括：实验环境，包括日期、天气，试剂规格、仪器的规格及品牌，实验场地等。实验时间为每一步操作的实际时间。实验步骤为每一步的实际操作（反应试剂及溶剂等的用量、加料顺序、加热、冷却等）。实验现象如反应液颜色的变化、有无沉淀及气体出现、固体的溶解情况、反应温度、pH值和加热后反应的变化等，都应认真记录。特别是与预期现象不同时，应按实际情况记录并结合操作步骤作为讨论问题的依据。



(4) 书写报告

实验结束后写出实验报告，实验报告一般应包括：实验日期、实验名称、仪器药品、反应原理、操作步骤、结果与讨论、意见和建议等。报告应力求条理清楚、文字简练、结论明确、书写整洁。

第 2 章

实验数据处理与 实验方案设计

2.1 实验与测量

任何实验都离不开对参数的测量、观察与分析，化学工程与工艺实验课程中也有不少实验参数的测量，如实验温度、压力、流量等参数的测量等。为保证实验结果的可靠性，必须要求实验过程中所测的各项参数的正确性。但由于实验方法和实验设备的不完善，周围环境的影响，以及人的观察力，测量程序等限制，实验测量值和真值之间，总是存在一定的差异，在数值上即表现为误差（或者说偏差）。为了提高实验的精度，缩小实验观测值和真值之间的差值，需要对实验数据误差进行分析和讨论。

必须说明的是，实验数据误差分析并不是即成事实的消极措施，而是给研究人员提供参与科学实验的积极武器。通过误差分析，可以认清误差的来源及影响，使我们有可能预先确定导致实验总误差的最大组成因素，并设法排除数据中所包含的无效成分，进一步改进实验方案。实验误差分析也提醒我们注意主要误差来源，精心操作，使研究的准确度得以提高。也可根据误差分析去选择最合适的仪器，进而对实验方法进行改进。下面介绍有关误差的一些基本概念。

2.2 误差的基本概念

2.2.1 误差的来源及分类

误差是实验测量值（包括间接测量值）与真值（客观存在的准确值）之差别，误差可以分为下面三类。

(1) 系统误差

由某些固定不变的因素引起的。在相同条件下进行多次测量，其误差的绝对值、符号总是保持恒定，使测量结果永远朝一个方向偏，或误差随条件按一定规律变化。

系统误差主要由下述因素引起。

① 测量仪器方面：如仪器设计上的缺点，零件制造不标准，安装不正确，未经校准等。假定在实验开始前，为研究而选用的电位计的指针不在零点，并且偏离 0.2mV 时，则在此

电位计读数为 1.2mV 时，实际上为 1mV。

② 环境因素：外界温度、湿度及压力变化引起的误差。如温度的变化将影响物体的长度和导线的电阻；大气压的变化将影响溶液的沸点温度；温度的变化将影响测量仪器而产生系统误差等。

③ 测量方法误差：近似的测量方法或近似的计算公式等引起的误差。

④ 测量人员的习惯偏向或动态测量时的滞后现象，有人对颜色的感觉不灵敏或读数时眼睛的位置总是偏高或偏低等。

总之，系统误差是恒差，单纯增加实验次数无法减少系统误差的影响，因为它在反复测定的情况下常保持同一数值与同一符号，故也称为常差。系统误差有固定的偏向和确定的规律，可按原因采取相应的措施给予校正或用公式消除。

(2) 随机误差（偶然误差）

由一些不易控制的因素引起，如测量值的波动，肉眼观察误差等。随机误差与系统误差不同，其误差的数值和符号不确定，它不能从实验中消除，但它服从统计规律，其误差与测量次数有关。随着测量次数的增加，出现的正负误差可以相互抵消，故多次测量的算术平均值接近于真值。

(3) 过失误差

由于实验人员粗心大意，如读数错误、记录错误或操作失误引起的误差。这类误差与正常值相差较大。若原因清楚，应及时清除。若原因不明，应根据统计学的 3σ 准则进行判别和取舍（ σ 称为标准误差）。所谓 3σ 准则，即如果实验测定量 x_i 与平均值 x_m 的残差 $|x_i - x_m| > 3\sigma$ ，则该测定值为坏值，应予剔除。

2.2.2 实验数据的真值与平均值

(1) 真值

真值是指某物理量客观存在的确定值，它通常是未知的。虽然真值是一个理想的概念，但对某一物理量经过无限多次的测量，出现的误差有正、有负，而正负误差出现的概率是相同的。因此，若不存在系统误差，它们的平均值相当接近于这一物理量的真值。故真值等于测量次数无限多时得到的算术平均值。由于实验工作中观测的次数是有限的，由此得出的平均值只能近似于真值，故称这个平均值为最佳值。

(2) 平均值

平均值有算术平均值、几何平均值、平方平均值（均方根平均值）、调和平均值、加权平均值等。平均值的选择主要取决于一组测量值分布的类型，在化工实验和科学研究中，数据的分布一般多属于正态分布，故多可采用算术平均值。

设 x_1, x_2, \dots, x_n 为各次测量值， n 为测量次数，则算术平均值为：

$$x_m = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

因为测定值的误差分布一般服从正态分布，可以证明算术平均值即为一组等精度测量的最佳值或最可信赖值。

2.2.3 误差的表示方法

(1) 绝对误差

测量值与真值之差的绝对值称为测量值的误差，即绝对误差。在实际工作中常以平均值（最佳值）代替真值，测量值与最佳值之差称为剩余误差，但习惯上也称为绝对误差。

如在实验中对物理量的测量只进行了一次，可根据测量仪器出厂鉴定书注明的误差，或取测量仪器最小刻度值的一半作为单次测量的误差。如某压力表精（确）度为 1.0 级，即表明该仪表最大误差为相当档次最大量程的 1.0%，若最大量程为 0.4MPa，该压力表的误差为：

$$0.4 \times 1.0\% = 0.004 \text{MPa}$$

化工实验中最常用的 U 形管压差计、转子流量计、秒表、量筒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) 相对误差

绝对误差与真值的绝对值之比，称为相对误差：

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \times 100\%$$

(3) 算术平均误差 (δ)

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_m|}{n}$$

(4) 标准误差（均方误差， σ ）

对有限测量次数，标准误差表示为：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n - 1}}$$

标准误差是目前最常用的一种表示精确度的方法，它不但与一系列测量值中的每个数据有关，而且对其中较大的误差或较小的误差敏感性很强，能较好地反映实验数据的精确度，实验愈精确，其标准误差愈小。

2.2.4 精密度、正确度和精确度

测量的质量和水平，既可以用误差的概念来描述，也可以用精确度等概念来反映，具体介绍如下。

(1) 精密度

在测量中所测得的数值重现的程度，称为精密度。精密度高则随机误差小。

(2) 正确度

在规定条件下，测量中所有系统误差的综合，称为正确度。正确度高则系统误差小。

(3) 精确度

测量值与真值接近的程度，称为精确度，为测量中所有系统误差和随机误差的综合。

对于实验和测量来说，精密度高，正确度不一定高。正确度高，精密度也不一定高。但当精确度高时，则精密度与正确度都高。

图 2-1 表示了精密度、正确度和精确度的含义。



图 2-1 精密度、正确度和精确度的含义示意图

2.3 实验数据的有效数与记数法

2.3.1 有效数字

任何测量结果或计算的量, 总是表现为数字, 而这些数字就代表了欲测量的近似值。究竟对这些近似值应该取多少位数合适呢? 应根据测量仪表的精度来确定, 一般应记录到仪表最小刻度的十分之一位。例如: 某液面计标尺的最小分度为 1mm, 则读数可以到 0.1mm。如在测定时液位高在刻度 524mm 与 525mm 的中间, 则应记液面高为 524.5mm, 其中前三位是直接读出的, 是准确的, 最后一位是估计的, 是欠准的, 该数据为 4 位有效数。如液位恰在 524mm 刻度上, 该数据应记为 524.0mm, 若记为 524mm, 则失去一位 (末位) 欠准数字。

总之, 有效数中应有且只能有一位 (末位) 欠准数字。

由上可见, 当液位高度为 524.5mm 时, 最大误差为 $\pm 0.5\text{mm}$, 也就是说误差为末位的一半。

2.3.2 科学记数法

在科学与工程中, 为了清楚地表达有效数或数据的精度, 通常将有效数写出并在第一位数后加小数点, 而数值的数量级由 10 的整数幂来确定, 这种以 10 的整数幂来记数的方法称科学记数法。例如: 0.0088 应记为 8.8×10^{-3} , 88000 (有效数 3 位) 记为 8.80×10^4 。应注意, 在科学记数法中, 在 10 的整数幂之前的数字应全部为有效数。

2.3.3 有效数字运算规则

有效数字的运算总的原则是, 除遵守数学运算法则外, 还规定, 准确数字与准确数字的运算结果仍为准确数字; 存疑数字与任何数字的运算结果均为存疑数字。在有效数字的运算过程中, 需要明确“0”的双重意义, 即作为普通数字使用或作为定位的标志。例如: 滴定管读数为 20.30mL。两个 0 都是测量出的值, 算做普通数字, 都是有效数字, 这个数据有效数字位数是四位。改用“L”为单位, 数据表示为 0.02030L, 前两个 0 是起定位作用的, 不是有效数字, 此数据是四位有效数字。对有效数字的位数有如下规定:

① 改变单位并不改变有效数字的位数;

- ② 在数字末尾加 0 作定位时, 要用科学计数法表示;
 ③ 在实验数据计算中遇到倍数、分数关系时, 视为无限多位有效数字;
 ④ 对数数值的有效数字位数由该数值的尾数部分决定。

注意: 首位为 8 或 9 的数字, 有效数字可多计一位。

有效数字的修约规定: 当尾数 ≤ 4 时则舍, 尾数 ≥ 6 时则入; 尾数等于 5 而后面的数都为 0 时, 5 前面为偶数则舍, 5 前面为奇数则入; 尾数等于 5 而后面还有不为 0 的任何数字, 无论 5 前面是奇或是偶都入。例如: 将下列数字修约为 4 位有效数字。

修约前 修约后

0.526647.....0.5266

0.36266112.....0.3627

10.23500.....10.24

250.65000.....250.6

18.085002.....18.09

3517.46.....3517

由于与误差传递有关, 有效数字计算时加减法和乘除法的运算规则不太相同。

① 加减法。计算结果的有效数字以小数点后位数最少的数据决定。计算过程中, 先按小数点后位数最少的数据对各个数据进行修约, 再进行加减计算。

例: 计算 $50.1 + 1.45 + 0.5812 = ?$

先直接计算: $50.1 + 1.45 + 0.5812 = 52.1312$

后修约: 52.1

先修约后计算: $50.1 + 1.4 + 0.6 = 52.1$

先修约, 结果相同且计算简捷。

例: 计算 $12.43 + 5.765 + 132.812 = ?$

先直接计算: $12.43 + 5.765 + 132.812 = 151.007$

后修约: 151.01

先修约后计算: $12.43 + 5.76 + 132.81 = 151.00$

根据运算规则, 结果应为: 151.00

注意: 用计算器计算后, 屏幕上显示的是 151, 但不能直接记录, 否则会影响以后的修约; 应在数值后添两个 0, 使小数点后有两位有效数字。

从上面的例子可以看出, 为了保证间接测量值的精度, 在设计实验装置时, 对所选取的仪器仪表其精度要求一致, 否则系统的精度将受到精度较低的仪器仪表限制。

② 乘法。计算结果的有效数字则以有效数字最少的数据来决定。先按有效数字最少的数据对各数据进行修约, 再进行乘除运算, 计算结果仍保留相同有效数字。

例: 计算 $0.0121 \times 25.64 \times 1.05782 = ?$

修约为: $0.0121 \times 25.6 \times 1.06 = ?$

计算后结果为: 0.3283456, 结果仍保留为三位有效数字,

记录为: $0.0121 \times 25.6 \times 1.06 = 0.328$

注意: 用计算器计算结果后, 要按照运算规则对结果进行修约。

例: 计算: $2.5046 \times 2.005 \times 1.52 = ?$

修约为: $2.50 \times 2.00 \times 1.52 = ?$