

普通高等教育“十三五”规划教材



化工原理实验

熊航行 许维秀 主编

HUAGONG YUANLI SHIYAN



化学工业出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

化工原理实验

熊航行 许维秀 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《化工原理实验》主要包括绪论,实验数据误差分析和数据处理,化工原理基础实验,化工原理演示及选修实验,化工原理仿真实验,化工原理实验数据的计算机处理等内容。

本书在内容和形式上更注重体现教学内容、教学模式、教学方法以及实验技术等方面的先进性,并体现基础性与先进性的有机结合,突出工程实验的特点,强调基础理论与工程实践相结合,强调工程观念的培养,注重化工实验的共性问题。

本书可作为高等院校化学工程与工艺、制药工程、过程装备与控制工程、材料科学与工程、高分子材料与工程、环境科学与工程、生物工程等专业的实验教材,也可供相关专业的研究人员参考。

化工原理实验

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理实验/熊航行,许维秀主编. —北京:化学工业出版社,2016.8

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-27448-9

I. ①化… II. ①熊… ②许… 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 (2016) 第 145177 号

责任编辑:旷英姿

责任校对:王素芹

文字编辑:向东

装帧设计:王晓宇

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:三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张10½ 字数233千字 2016年9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:27.00 元

版权所有 违者必究

化工原理实验作为化工类人才培养过程中重要的实践环节，在培养知识面广、动手能力强且独立思维能力较强的创新人才教育中起着重要的作用。它具有直观性、实践性、综合性和创新性，而且还能培养学生具有一丝不苟的工作作风和实事求是的工作态度。近年来，现代化化工厂逐渐实现自动化和半自动化的生产控制，大量的工作人员从繁杂的操作中解脱出来，这对现代化的员工也提出了更高的要求。目前，大型化工厂基本实现 DCS 系统中央集中控制，员工除了掌握基本的化工单元操作知识外，还需要熟悉计算机 DCS 系统控制的相关知识。因此，现代的化工单元操作实验教学也需要跟随社会发展的要求，进行教学改革。

《化工原理实验》根据荆楚理工学院化工原理任课教师多年的教学实践而编写。本书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解决工程问题，紧密结合计算机技术和软件的应用，如设置化工原理仿真实验（3D）、化工原理实训以及实验数据的计算机处理等内容。对于一些综合性较强、涉及内容较多的实验，给出了实验记录、表格整理及实验数据处理和分析方法示例，供学生参考。

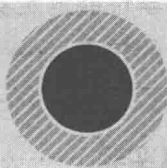
本书由荆楚理工学院熊航行、许维秀任主编，荆楚理工学院熊泽云、王洪林参与编写，第 1~4 章由熊航行编写，第 5 章由许维秀编写，第 6 章由熊泽云编写，附录由王洪林编写。

本书在编写过程中，参阅了有关杂志和兄弟院校的教材等资料，由于篇幅所限，未能一一列举，谨此说明。

由于时间紧迫、能力所限，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

2016 年 3 月



第1章 绪论	001
1.1 化工原理实验的目的及要求	001
1.1.1 化工原理实验的目的	001
1.1.2 化工原理实验的要求	002
1.1.3 实验报告的编写	004
1.2 化工原理实验室规则	005
第2章 实验数据误差分析和数据处理	007
2.1 实验数据的误差分析	007
2.1.1 误差的基本概念	007
2.1.2 有效数字及其运算规则	011
2.1.3 误差的基本性质	013
2.2 实验数据的处理方法	019
2.2.1 列表法	019
2.2.2 图示法	021
2.2.3 数学方程表示法	023
第3章 化工原理基础实验	033
实验1 流体流动阻力的测定	033
实验2 离心泵特性曲线的测定	036
实验3 恒压过滤实验	040
实验4 气-汽对流传热实验	044
实验5 精馏塔实验	047
实验6 二氧化碳吸收与解吸实验	052
实验7 干燥速率曲线测定实验	055
实验8 流体流动综合实验	059
实验9 萃取塔（桨叶）实验装置	069
第4章 化工原理演示及选修实验	072
实验1 流体的流动状态——雷诺实验	072
实验2 旋风分离器	074

实验 3 塔板流体力学性能测定实验	075
实验 4 孔板流量计的校正	077
实验 5 喷雾干燥实验	082
第 5 章 化工原理仿真实验	085
5.1 化工原理虚拟实验室功能介绍	085
5.1.1 培训内容	085
5.1.2 基本操作	086
5.1.3 菜单键功能说明	086
5.1.4 详细说明	087
5.2 化工原理仿真实验	089
实验 1 流动过程综合实验仿真	089
实验 2 恒压过滤实验仿真	102
实验 3 传热实验仿真	104
实验 4 精馏实验仿真	111
实验 5 吸收解吸实验仿真	116
实验 6 萃取塔实验仿真	123
实验 7 洞道干燥实验仿真	128
第 6 章 化工原理实验数据的计算机处理	134
6.1 Excel 数据处理基础知识	134
6.2 Excel 处理基本化工原理实验数据示例	134
6.2.1 流体流动阻力实验	134
6.2.2 离心泵特性曲线测定实验	139
6.2.3 过滤实验	142
6.2.4 空气-水套管换热实验	145
6.2.5 全回流精馏实验	148
6.2.6 部分回流精馏实验	150
6.2.7 干燥实验	151
附录	153
附录 1 常用数据	153
附录 2 阿贝折射仪的使用方法	154
附录 3 快速水分测定仪的使用方法	155
参考文献	162

化工原理实验是一门以化工单元操作过程原理和设备为主要内容、以处理工程问题的实验研究方法为特色的实践性课程。通过本课程的学习,巩固和加深对化工原理课程中基本理论知识的理解,了解典型化工设备的原理和操作,掌握化工中用数学模型法和因次论指导下的实验研究方法及数据处理,掌握化工数据的基本测试技术。并能运用所学的理论知识去解决实验中遇到的各种实际问题,培养科学的思维方法及严谨的科学作风。

本课程内容强调实践性和工程观念,并将能力和素质培养贯穿于实验课的全过程。围绕“化工原理”课程中最基本的理论,开设有基础型和综合型等实验,培养学生掌握实验研究方法,培养学生严谨的科学态度和工程观念,训练其独立思考、综合分析问题和解决问题的能力。因此,在实验课的全过程中,学生在思维方法和创新能力方面都得到培养和提高,为今后的学习和工作打下坚实的基础。

1.1 化工原理实验的目的及要求

1.1.1 化工原理实验的目的

(1) 巩固和深化理论知识

在学习化工基础课程的基础上,进一步理解一些比较典型的已被或将被广泛应用的化工过程与设备的原理和操作,巩固和深化化工基础的理论知识。

(2) 提供一个理论联系实际的机会

用所学的化工基础等化学化工的理论知识去解决实验中遇到的各种实际问题,同时学习在化工领域内如何通过实验获得新的知识和信息。

(3) 培养学生从事科学实验的能力

实验能力主要包括:

- ① 为了完成一定的研究课题,设计实验方案的能力;
- ② 进行实验,观察和分析实验现象的能力和解决实验问题的能力;
- ③ 正确选择和使用测量仪表的能力;
- ④ 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,以数学方式或图标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;

⑤ 运用文字表达技术报告的能力等。

学生只有通过一定数量的实验训练,才能掌握各种实验技能,为将来从事科学研究和解决工程实际问题打下坚实基础。

(4) 培养科学的思维方法、严谨的科学态度和良好的科学作风,提高自身素质水平。

1.1.2 化工原理实验的要求

为了能达到较好的实验效果,要求实验前必须做到以下几个环节。

(1) 课前预习

① 认真阅读实验教材,掌握实验项目要求、实验原理、实验步骤及所需测量的参数。熟悉实验所用测量仪表的使用方法,掌握其操作规程和安全注意事项。

② 到实验室现场熟悉实验设备和流程,摸清测试点和控制点位置。确定操作程序、所测参数项目、所测参数单位及所测数据点如何分布等。

③ 具有 CAI——计算机辅助教学设备的,可让学生进行计算机仿真练习。通过计算机仿真练习,熟悉各个实验的操作步骤和注意事项,以增强实验效果。

④ 在预习和计算机仿真练习基础上,写出实验预习报告。预习报告内容包括实验目的、原理、流程、操作步骤、注意事项等。准备好原始数据记录表格,并标明各参数的单位。

⑤ 特别要注意使用设备或实验操作中可能会产生的危险,以保证实验过程中人身和设备安全。不预习实验者不准做实验。预习报告经指导教师检查通过后方可进行实验。

(2) 实验操作环节 一般以 3~4 人为一小组合作进行实验,实验前必须做好组织工作,做到既分工、又合作。每个组员要各负其责,并且要在适当的时候进行轮换工作,这样既能保证质量,又能获得全面的训练。实验操作注意事项如下。

① 实验设备的启动操作,应按教材说明的程序逐项进行,设备启动前必须检查。

a. 对泵、风机、压缩机、真空泵等设备,启动前先用手扳动联轴节,看能否正常转动。

b. 设备、管道上各个阀门的开、闭状态是否合乎流程要求。

上述皆为正常时,才能合上电闸,使设备运转。

② 操作过程中设备及仪表有异常情况时,应立即按停车步骤停车并报告指导教师,对问题的处理应了解其全过程,这是分析问题和处理问题的极好机会。

③ 操作过程中应随时观察仪表指示值的变动,确保操作过程在稳定条件下进行。出现不符合规律的现象时应注意观察研究,分析其原因,不要轻易放过。

④ 停车前应先将有关气源、水源、电源关闭,然后切断电机电源,并将各阀门恢复至实验前所处的位置(开或关)。

(3) 测定、记录和数据处理

① 确定要测定的数据 凡是与实验结果有关或在整理数据时必须用到的参数都应测定。原始数据记录表的设计应在实验前完成。原始数据应包括工作介质性质、操作条

件、设备几何尺寸及大气条件等。并不是所有数据都要直接测定，凡是可以根据某一参数推导出或根据某一参数由手册查出的数据，就不必直接测定。例如水的黏度、密度等物理性质，一般只要测出水温后即可查出，因此不必直接测定水的黏度、密度，而应该改测水的温度。

② 实验数据的分割 实验时要测的数据尽管有多个，但常选择其中一个数据作为自变量来控制，而把其他受其影响或控制的随之而变的数据作为因变量，如离心泵特性曲线就将流量作为自变量，而将其他同流量有关的扬程、轴功率、效率等作为因变量。实验结果又往往要将这些所测的数据标绘在各种坐标系上，为了使所测数据在坐标系上得到分布均匀的曲线，这里就涉及实验数据均匀分割的问题。化工原理实验最常用的有两种坐标系；直角坐标系和双对数坐标系，坐标系不同所采用的分割方法也不同。其分割值 x 与实验预定的测定次数 n 以及其最大、最小的控制量 $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 之间的关系如下：

a. 对于直角坐标系

$$x_i = x_{\min} \quad \Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{n - 1} \quad \Delta x_{i+1} = x_i + \Delta x$$

b. 对于双对数坐标系

$$x_i = x_{\min} \quad \lg \Delta x = \frac{\lg x_{\max} - \lg x_{\min}}{n - 1}$$

$$\text{因此, } \Delta x = \left(\frac{x_{\max}}{x_{\min}} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad x_{i+1} = x_i \Delta x$$

③ 读数与记录

a. 待设备各部分运转正常，操作稳定后才能读取数据。如何判断是否已达稳定，一般要经两次测定，其读数应相同或十分相近。当变更操作条件后，各项参数达到稳定需要一定的时间，因此也要待其稳定后方可读数，否则易造成实验结果无规律甚至反常。

b. 同一操作条件下，不同数据最好是数人同时读取，若操作者同时兼读几个数据时，应尽可能动作敏捷。

c. 每次读数都应与其他有关数据及前一点数据对照，看看相互关系是否合理，如不合理应查找原因，是现象反常还是读错了数据，并要在记录上注明。

d. 所记录的数据应是直接读取的原始数值，不要经过运算后记录，例如秒表读数 1 分 23 秒，应记为 1'23"，不要记为 83"。

e. 读取数据必须充分利用仪表的精度，读至仪表最小分度以下一位数，这个数应为估计值。如水银温度计最小分度为 0.1℃，若水银柱恰指 22.4℃ 时，应记为 22.40℃。注意过多取估计值的位数是毫无意义的。

有些参数在读数过程中波动较大，读取时，首先要设法减小其波动。在波动不能完全消除的情况下，可取波动的最高点与最低点两个数据，然后取平均值。在波动不很大时，可取一次波动的高低点之间的中间值作为估计值。

f. 不要凭主观臆测修改记录数据，也不要随意舍弃数据，对可疑数据，除有明显原因，如读错、误记等情况使数据不正常可以舍弃之外，一般应在数据处理时检查处理。

g. 记录完毕要仔细检查一遍，有无漏记或记错之处，特别要注意仪表上的计量单

位。实验完毕，须将原始数据记录表格交指导教师检查并签字，认为准确无误后方可结束实验。

④ 数据的整理及处理

a. 原始记录只可进行整理，绝不可以随便修改。经判断确实为过失误差造成的不正确数据须注明后可以剔除不计入结果。

b. 采用列表法整理数据清晰明了、便于比较，一张正式实验报告一般要有四种表格：原始数据记录表、中间运算表、综合结果表和结果误差分析表。中间运算表之后应附有计算示例，以说明各项之间的关系。

c. 运算中尽可能利用常数归纳法，以避免重复计算，减少计算错误。例如，流体阻力实验，计算 Re 和 λ 值，可按以下方法进行。

例如， Re 的计算

$$Re = \frac{d u \rho}{\mu}$$

其中 d 、 μ 、 ρ 在水温不变或变化甚小时可视为常数，合并为 A ($A = \frac{d\rho}{\mu}$)，故有

$$Re = Au$$

A 的值确定后，改变 u 值可算出 Re 值。

又例如，管内摩擦系数 λ 值的计算，由直管阻力计算公式

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{\rho u^2}{2}$$

得

$$\lambda = \frac{d}{l} \times \frac{2}{\rho} \times \frac{\Delta p}{u^2} = B' \frac{\Delta p}{u^2}$$

式中，常数 $B' = \frac{d}{l} \times \frac{2}{\rho}$ 。

实验中流体压降 Δp ，用 U 形压差计读数 R 测定，则 $\Delta p = gR (\rho_0 - \rho) = B''R$

式中，常数 $B'' = g (\rho_0 - \rho)$ 。

将 Δp 代入上式整理为

$$\lambda = B' B'' \frac{R}{u^2} = B \frac{R}{u^2}$$

式中，常数 B 为 $B = \frac{d}{l} \times \frac{2g (\rho_0 - \rho)}{\rho}$

仅有变量 R 和 u ，这样 λ 的计算非常方便。

d. 实验结果及结论用列表法、图示法或回归分析法来说明都可以，但均需标明实验条件。列表法、图示法和回归分析法详见第 3 章实验数据处理。

(4) 编写实验报告

实验报告根据各个实验要求按传统实验报告格式编写。实验报告应按规定时间上交，否则报告成绩要扣分；不交实验报告者不允许参加期末笔试。

1.1.3 实验报告的编写

实验报告是实验工作的全面总结和系统概括，是实践环节中不可缺少的一个重要组

成部分。实验报告可以按传统实验报告格式。

以下介绍传统实验报告格式。

本课程实验报告的内容应包括以下几项。

① 实验报告封面 实验名称, 报告人姓名、班级及同组实验人姓名, 实验地点, 指导教师, 实验日期, 上述内容作为实验报告的封面。

② 实验目的和内容 简明扼要地说明为什么要进行本实验, 实验要解决什么问题。

③ 实验的理论依据(实验原理) 简要说明实验所依据的基本原理, 包括实验涉及的主要概念, 实验依据的重要定律、公式及据此推算的重要结果。要求准确、充分。

④ 实验装置流程示意图 简单地画出实验装置流程示意图和测试点、控制点的具体位置并注明主要设备、仪表的名称。标出设备、仪器仪表及调节阀等的标号, 在流程图的下方写出图名及与标号相对应的设备、仪器等的名称。

⑤ 实验操作要点 根据实际操作程序划分为几个步骤, 并在前面加上序数词, 以使条理更为清晰。对于操作过程的说明应简单、明了。

⑥ 注意事项 对于容易引起设备或仪器仪表损坏、容易发生危险以及一些对实验结果影响比较大的操作, 应在注意事项中注明, 以引起注意。

⑦ 原始数据记录 记录实验过程中从测量仪表所读取的数值。读数方法要正确, 记录数据要准确, 要根据仪表的精度决定实验数据的有效数字的位数。

⑧ 数据处理 数据处理是实验报告的重点内容之一, 要求将实验原始数据经过整理、计算、加工成表格或图的形式。表格要易于显示数据的变化规律及各参数的相关性; 图要能直观地表达变量间的相互关系。

⑨ 数据处理计算过程举例 以某一组原始数据为例, 把各项计算过程列出, 以说明数据整理表中的结果是如何得到的。

⑩ 实验结果的分析与讨论 实验结果的分析与讨论是实验者理论水平的具体体现, 也是对实验方法和结果进行的综合分析研究, 是工程实验报告的重要内容之一, 主要包括以下内容。

- a. 从理论上对实验所得结果进行分析和解释, 说明其必然性;
- b. 对实验中的异常现象进行分析讨论, 说明影响实验的主要因素;
- c. 分析误差的大小和原因, 指出提高实验结果的途径;
- d. 将实验结果与前人和他人的结果对比, 说明结果的异同, 并解释这种异同;
- e. 本实验结果在生产实践中的价值和意义, 推广和应用效果的预测等;
- f. 由实验结果提出进一步的研究方向或对实验方法及装置提出改进建议等。

⑪ 实验结论 结论是根据实验结果所做出的最后判断, 得出的结论要从实际出发, 有理论依据。

1.2 化工原理实验室规则

① 实验室是进行科学实验的场所, 到实验室进行实验时应保持实验室的整洁和安静。禁止在实验室内大声喧哗、追逐嬉闹和随地吐痰; 禁止赤足、穿拖鞋进实验室。

② 在实验室内必须以严肃认真的态度进行实验，遵守实验室的各项规章制度，不得迟到、无故缺课，室内不得进行与实验无关的事。

③ 爱护仪器、实验设备及实验室其他设施。在未弄清仪器设备使用前，不得运转；否则，损坏照价赔偿。在保证完成实验要求下，注意节约水、电、气、油以及化学药品等。

④ 实验操作过程中，注意用电、用液化气及使用有害药品的安全；注意防火，实验室内严禁吸烟，精馏塔等附近不准使用明火；启动电器设备时，防触电，注意电机有无异常声音。

⑤ 实验过程中，注意保持实验环境的整洁。实验结束后应进行清洁和整理，将仪器设备恢复原状。

⑥ 实验过程中，如因违反操作规程损坏仪器、设备者，应根据情节轻重和认识态度由指导教师会同实验室负责人商定，按仪器、设备价值酌情折价赔偿，情节严重、损失较大者，上报学校进行处理。

⑦ 实验过程中应服从指导教师及实验室工作人员的指导。否则，将视其情节进行批评直至停止实验操作。

⑧ 实验完毕，须做好清洁工作，恢复仪器设备到原状，关闭水、电、气等。并将实验中所记录的数据交与教师审查签字后，方可离开实验室。

2.1 实验数据的误差分析

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。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,缩小实验测量值和真值之间的差值,提高实验的精确性。

2.1.1 误差的基本概念

测量就是用实验的方法,将被测物理量与所选用作为标准的同类量进行比较,从而确定它的大小。

(1) 真值与平均值

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。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。但是实际上实验测量的次数总是有限的。用有限测量值求得的平均值只能是近似真值,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 几何平均值是将一组 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

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

④ 对数平均值 在化学反应、热量和质量传递中,其分布曲线多具有对数的特性,在这种情况下表征平均值常用对数平均值。

设两个量 x_1 、 x_2 , 其对数平均值

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

应指出,变量的对数平均值总小于算术平均值。当 $x_1/x_2 \leq 2$ 时,可以用算术平均值代替对数平均值。

当 $x_1/x_2 = 2$, $\bar{x}_{\text{对}} = 1.44x_2$, $\bar{x} = 1.50x_2$, $[(\bar{x} - \bar{x}_{\text{对}}) / \bar{x}_{\text{对}}] \times 100\% = 4.2\%$, 即 $x_1/x_2 \leq 2$, 引起的误差不超过 4.2%。

以上介绍各平均值的目的是要从一组测定值中找出最接近真值的那个值。在化工实验和科学研究中,数据的分布较多属于正态分布,所以通常采用算术平均值。

(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由未发觉或未确认的因素所引起的误差,而这些因素影响结果永远朝一个方向偏移,其大小及符号在同一组实验测定中完全相同,当实验条件一经确定,系统误差就获得一个客观上的恒定值。

当改变实验条件时,就能发现系统误差的变化规律。

系统误差产生的原因:测量仪器如刻度不准,仪表零点未校正或标准表本身存在偏差等;周围环境的改变,如温度、压力、湿度等偏离校准值;实验人员的习惯和偏向,如读数偏高或偏低等引起的误差。针对仪器的缺点、外界条件变化影响的大小、个人的偏向,待分别加以校正后,系统误差是可以清除的。

② 偶然误差 在已消除系统误差的一切量值的观测中,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,时而大时而小、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,倘若对某一量值做足够多次的等精度测量后,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术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,它往往是由实验人员粗心大意、过度疲劳和操作不正确等原因引起的。此类误差无规律可循,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。

(3) 精密度、准确度和精确度

反映测量结果与真实值接近程度的量,称为精度(亦称精确度)。它与误差大小相对应,测量的精度越高,其测量误差就越小。“精度”应包括精密度和准确度两层含义。

① 精密度 测量中所测得数值重现性的程度,称为精密度。它反映偶然误差的影响程度,精密度高就表示偶然误差小。

② 准确度 测量值与真值的偏移程度,称为准确度。它反映系统误差的影响精度,

准确度高就表示系统误差小。

③ 精确度(精度) 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,但精确度高,则精密度和准确度都高。

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

图 2-1 (a) 表示精密度和准确度都很好,则精确度高;图 2-1 (b) 表示精密度很好,但准确度却不高;图 2-1 (c) 表示精密度与准确度都不好。

绝对真值是不可知的,人们只能制定出一些国际标准作为测量仪表准确性的参考标准。随着人类认识运动的推移和发展,可以逐步逼近绝对真值。

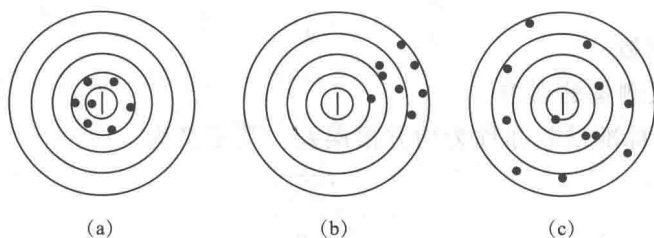


图 2-1 精密度和准确度的关系

(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,测量结果总不可能准确地等于被测量的真值,而只是它的近似值。测量的质量高低以测量精确度作指标,根据测量误差的大小来估计测量的精确度。测量结果的误差越小,则认为测量就越精确。

① 绝对误差 测量值 X 和真值 A_0 之差为绝对误差,通常称为误差。记为

$$D = X - A_0 \quad (2-5)$$

由于真值 A_0 一般无法求得,因而式 (2-5) 只有理论意义。常用高一级标准仪器的示值作为实际值 A 以代替真值 A_0 。由于高一级标准仪器存在较小的误差,因而 A 不等于 A_0 ,但总比 X 更接近于 A_0 。 X 与 A 之差称为仪器的示值绝对误差。记为

$$d = X - A \quad (2-6)$$

与 d 相反的数称为修正值,记为

$$C = -d = A - X \quad (2-7)$$

通过检定,可以由高一级标准仪器给出被检仪器的修正值 C 。利用修正值便可以求出该仪器的实际值 A 。即

$$A = X + C \quad (2-8)$$

② 相对误差 某一测量值的准确程度,一般用相对误差来表示。示值绝对误差 d 与被测量的实际值 A 的百分比值称为实际相对误差。记为

$$\delta_A = \frac{d}{A} \times 100\% \quad (2-9)$$

以仪器的示值 X 代替实际值 A 的相对误差称为示值相对误差。记为

$$\delta_X = \frac{d}{X} \times 100\% \quad (2-10)$$

一般来说,除了某些理论分析外,用示值相对误差较为适宜。

③ 引用误差 为了计算和划分仪表精确度等级,提出引用误差概念。其定义为仪表示值的绝对误差与量程范围之比。

$$\delta_B = \frac{\text{示值绝对误差}}{\text{量程范围}} \times 100\% = \frac{d}{X_n} \times 100\% \quad (2-11)$$

式中 d ——示值绝对误差;

X_n ——标尺上限值—标尺下限值。

④ 算术平均误差 算术平均误差是各个测量点的误差的平均值。

$$\delta_{\text{平}} = \frac{\sum |d_i|}{n} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2-12)$$

式中 n ——测量次数;

d_i ——第 i 次测量的误差。

⑤ 标准误差 标准误差亦称为均方根误差。其定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}} \quad (2-13)$$

式(2-13)使用于无限测量的场合。实际测量工作中,测量次数是有限的,则改用式(2-14)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}} \quad (2-14)$$

标准误差不是一个具体的误差, σ 的大小只说明在一定条件下等精度测量集合所属的每一个测量值对其算术平均值的分散程度, σ 的值越小说明每一次测量值对其算术平均值分散度越小,测量的精度越高,反之精度越低。

在化工原理实验中最常用的 U 形管压差计、转子流量计、秒表、量筒、电压计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。

(5) 测量仪表精确度

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

$$\delta_{n\max} = \frac{\text{示值最大绝对误差}}{\text{量程范围}} \times 100\% = \frac{d_{\max}}{X_n} \times 100\% \quad (2-15)$$

式中 $\delta_{n\max}$ ——仪表的最大测量引用误差;

$d_{\max}$ ——仪表示值的最大绝对误差;

X_n ——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。

测量仪表的精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注在仪表的面板上。例如,某台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

简称为 1.5 级仪表。

仪表的精度等级为 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 $\delta_{\max}$ 不能超过的界限，即

$$\delta_{\max} = \frac{d_{\max}}{X_n} \times 100\% \leq a \quad (2-16)$$

由式 (2-16) 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

$$d_{\max} \leq a X_n \quad (2-17)$$

而用仪表测量的最大值相对误差为

$$\delta_{\max} = \frac{d_{\max}}{X_n} \leq a \frac{X_n}{X} \quad (2-18)$$

由式 (2-18) 可以看出，只是用仪表测量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，可用式 (2-19) 对仪表的测量误差进行估计，即

$$\delta_m = a \frac{X_n}{X} \quad (2-19)$$

【例 2-1】 用量限为 5A，精度为 0.5 级的电流表，分别测量两个电流， $I_1 = 5A$ ， $I_2 = 2.5A$ ，试求测量值 I_1 和 I_2 的相对误差为多少？

解

$$\delta_{m1} = a \frac{I_n}{I_1} = 0.5\% \times \frac{5}{5} = 0.5\%$$

$$\delta_{m2} = a \frac{I_n}{I_2} = 0.5\% \times \frac{5}{2.5} = 1.0\%$$

由此可见，当仪表的精度等级选定时，所选仪表的测量上限越接近被测量的值，则测量值的误差的绝对值越小。

【例 2-2】 欲测量约 90V 的电压，实验室现有 0.5 级 0~300V 和 1.0 级 0~100V 的电压表。问选用哪一种电压表进行测量较好？

解 用 0.5 级 0~300V 的电压表测量 90V 的电压的相对误差为

$$\delta_{m0.5} = a_1 \frac{U_n}{U} = 0.5\% \times \frac{300}{90} = 1.7\%$$

用 1.0 级 0~100V 的电压表测量 90V 的电压的相对误差为

$$\delta_{m1.0} = a_2 \frac{U_n}{U} = 1.0\% \times \frac{100}{90} = 1.1\%$$

上例说明，如果选择得当，用量程范围适当的 1.0 级仪表进行测量，能得到比用量程范围大的 0.5 级仪表更准确的结果。因此，在选用仪表时，应根据被测量值的大小，在满足被测量数值范围的前提下，尽可能选择量程小的仪表，并使测量值大于所选仪表满刻度的 $2/3$ ，即 $X > 2X_n/3$ 。这样既可以满足测量误差要求，又可以选择精度等级低的测量仪表，从而降低仪表的成本。

2.1.2 有效数字及其运算规则

在科学与工程中，该用几位有效数字来表示测量或计算结果，总是以一定位数的数