



TEACHING MATERIALS
FOR COLLEGE STUDENTS
高等学校教材



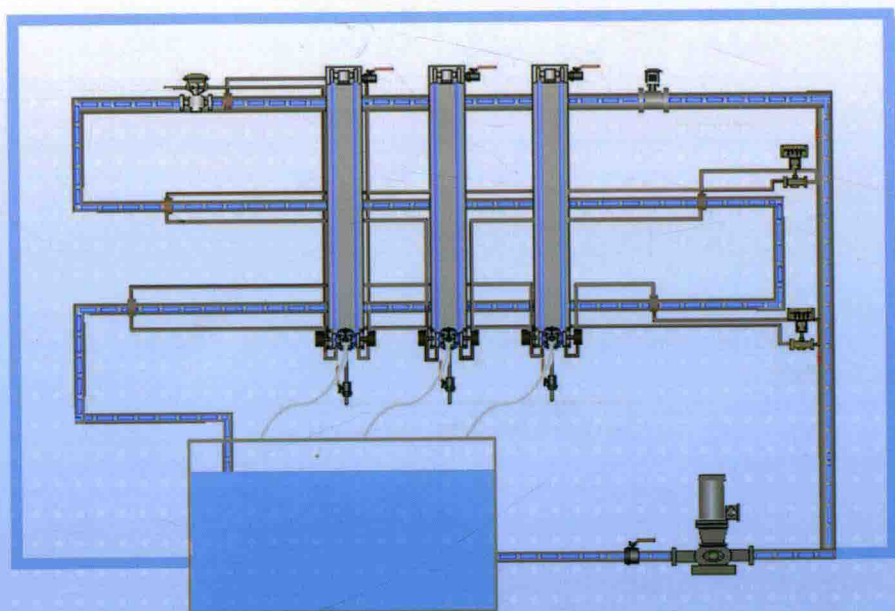
化工原理基础实验



Basic Experiments of Chemical Engineering Principle

主编 袁相爱

参编 周 迪 吕晓霞 王婷婷 刘西德



曲阜师范大学化学与化工学院

 中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS



TEACHING MATERIALS
FOR COLLEGE STUDENTS
高等学校教材

化工原理基础实验

主编 袁相爱

参编 周 迪 吕晓霞 王婷婷 刘西德



中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

图书在版编目(CIP)数据

化工原理基础实验/袁相爱主编. —东营:中国
石油大学出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-5636-6102-2

I. ①化… II. ①袁… 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(2018)第 137916 号

书 名: 化工原理基础实验

主 编: 袁相爱

参 编: 周 迪 吕晓霞 王婷婷 刘西德

责任编辑: 岳为超 高 颖(电话 0532—86981532)

封面设计: 赵志勇

出 版 者: 中国石油大学出版社

(地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号 邮编: 266580)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子邮箱: shiyoujiaoyu@126.com

排 版 者: 青岛天舒常青文化传媒有限公司

印 刷 者: 日照日报印务中心

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981531, 86983437)

开 本: 185 mm×260 mm

印 张: 9.25

字 数: 224 千

版 印 次: 2018 年 7 月第 1 版 2018 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5636-6102-2

定 价: 28.00 元

前言

PREFACE

近年来随着科技的发展,化工实验装置不断更新,测试方法及仪器设备也在不断升级,迫切要求加强实验教材内容建设,而且社会对人才培养要求的不断提高也对实验教学提出了更高的标准,因而加强学生动手能力、实验操作技能的培养,尤其是提高学生的创新能力和科研素质是本书编写的初衷。

作为化工类基础实验课教材,本书强调学生对基本概念、基本操作和基础训练的掌握,突出在实验教学各个环节中对学生素质及能力的培养。本书是根据化工实验室现有的实验仪器设备编写而成的,无论是旧实验装置的改进还是新实验装置的开设,都力求在实验内容上加深和拓宽,为学生提供更为广阔的思考及动手操作的空间。本书编写过程中力求语言文字简洁、叙述层次清楚,重点突出实用。本书适用于化学、化学工程与工艺、应用化学、材料化学、生物工程、环境化学等各专业学生使用。

为适应实验教学改革的发展和需要,吸收近年来化学工程实验教学所取得的成果,曲阜师范大学化学与化工学院化学工程教研室全体教师结合多年来实验教学体会和经验,对本书进行了多次讨论、修改。本书内容简洁易懂,注重学生化工实验操作技能和动手能力的培养,特别是在数据处理方面更加清晰明确,便于所测物理量的记录和结果处理。在本书编写过程中,得到了曲阜师范大学化学与化工学院领导和同事的大力帮助以及国内其他院校相关专家的指导,同时参阅了相关化工原理实验教材,在此一并表示感谢。

虽然编者尽了较大的努力,但由于水平所限,书中错误和疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2018年3月

目 录

CONTENTS

第一章 绪 论	1
一、化工原理基础实验的特点	1
二、化工原理基础实验的基本要求	1
三、实验教学内容及教学方法	2
四、化工实验安全知识	3
第二章 化工实验基础知识	7
第一节 实验数据处理与测量误差分析	7
一、实验数据读取与有效数字	7
二、实验数据的测量误差	9
第二节 实验数据的处理及正交实验设计	13
一、实验数据的处理方法	13
二、正交实验设计法	16
第三节 化工参数的测量方法	23
一、压力测量及仪表	23
二、流量测量及仪表	28
三、温度测量及仪表	32
四、成分分析及仪表	35
第三章 化工原理基础实验	39
实验 1 流体流动型态及雷诺准数测定	39
实验 2 流量计校正及流量测定	43
实验 3 管路流体阻力测定	49
实验 4 流体机械能转换实验	54

实验 5	离心泵特性曲线测定	60
实验 6	离心泵串、并联特性曲线测定	64
实验 7	恒压过滤实验	70
实验 8	气-液对流传热系数测定	76
实验 9	空气-蒸汽传热系数测定	82
实验 10	水吸收二氧化碳传质系数的测定	88
实验 11	丙酮-水体系吸收传质系数的测定	93
实验 12	氧气解吸及传质系数测定	97
实验 13	填料性能评价及等板高度测定	100
实验 14	筛板精馏塔效率的测定	105
实验 15	不同进料板精馏塔效率的测定	111
实验 16	液-液萃取效率测定	117
实验 17	洞道干燥速率曲线测定	123
实验 18	流化干燥速率曲线测定	128
实验 19	固体流态化实验	131
附录	化工实验常用数据表	136
参考文献		142

第一章 绪 论

一、化工原理基础实验的特点

化工原理基础实验所使用的仪器多,实验装置结构复杂,影响实验结果的因素众多。

化工原理基础实验属于工程实验的范畴,它不同于基础化学课程的实验,后者面对的是基础科学,采用的方法是理论的、严密的,所处理的体系通常是简单的、基础的甚至是理想的,而工程实验面对的是复杂的实际问题。化工原理基础实验的影响因素多,实验过程变化多样,实验对象不同,实验研究方法也必然不同。工程实验的困难之处在于变量多,涉及的物料千变万化,设备大小差别较大,实验工作量之大可想而知,因此不能把处理一般实验的方法简单地套用于化工原理基础实验中。

为了解决工程实验的实际问题,因次论指导下的实验研究方法和数学模型方法是常用的2种基本方法,这2种方法可以成功地使实验研究结果由小及大、由此及彼地应用于大设备的生产设计中。例如,在因次论指导下的实验不需要对过程进行深入理解,也不需要采用真实的物料、实际的流体和实际尺寸的设备,只需借助模拟物料(如空气、水、黄沙等),在实验室规模的小设备中经过一些预备性的实验或理性的推断就可得出过程的影响因素,从而加以归纳和概括成经验方程。这种在因次论指导下的实验研究方法是解决难以做出数学描述的复杂问题的一种有效方法。数学模型方法是在对过程充分认识的基础上,将过程高度概括,得到简单而不失真的物理模型,然后给予数学上的描述。因次论指导下的实验研究方法和数学模型方法反映了工程实验和基础实验的主要区别。

化工原理基础实验是由许多化工单元操作过程和设备组合而成的,实验过程涉及的内容广,处理和测量的物理量众多,实验过程工作量较大。通过化工原理基础实验的实际操作,学生应学会处理工程问题的实验方法,加强对课堂所学理论的理解,提高理论联系实际的能力,会运用理论指导并能独立进行化工单元的操作,在实验室现有实验设备的基础上完成实验,并能预测实验过程中某些参数的变化对实验过程的影响。

二、化工原理基础实验的基本要求

1. 实验研究方法和数据处理要求

(1) 掌握化工原理基础实验的研究方法和数据处理方法,掌握如何规划实验,检验数学模型的有效性和模型参数的估值方法。化学工程问题的2种基本实验研究方法为应用因次论进行实验规划的方法和利用半经验半理论的方法或数学模型方法。

(2) 掌握最基本的经验参数和模型参数的估值方法——最小二乘法。

(3) 对于特定的工程问题,在缺乏数据的情况下,学会组织实验以取得必要的设计数据。

(4) 掌握实验设计方法,应做到:① 在实验安排上尽可能地减少实验次数;② 在进行较少次数实验的基础上,能够利用所得的实验数据分析出指导实践的正确结论,并得到较好的结果。掌握一种科学地安排和分析多因素实验的方法——正交实验设计法。

2. 化工原理基础实验数据的基本测试技术

化工原理基础实验需要测定的实验数据较多,而且实验过程中的影响因素也较多,因此掌握实验数据的测定方法非常重要。化工原理基础实验数据基本包括操作参数(如流体流量、体系温度及压力等)和设备特性参数(如阻力系数、传热系数、传质系数等)以及特性曲线的测试数据等。

3. 化工原理基础实验中典型实验设备的操作方法

应了解化工原理基础实验中典型实验设备的具体结构、操作方法以及影响实验操作的各种因素,熟悉实验过程中需要测定的各种参数,能够在现有的实验设备上完成指定的工艺要求,并能够预测某些参数的变化对实验设备的影响。实验过程中应根据实验条件的变化对实验操作做出适当的调整。

4. 综合性设计实验的训练

在认真学习理论课程及基础性化工原理实验操作的训练后,首先按照实验指导教师的要求进行综合性设计实验的锻炼,自行设计实验内容和实验操作方法,选好实验课题后首先进行资料的查阅;然后写出实验原理、实验方法、实验实施过程、实验注意事项及该课题的具体应用,经实验指导教师审阅批准后,进行实际的实验操作;最后根据实验结果写出综合性设计实验的结题报告,并进行答辩。通过综合性设计实验的锻炼,提高自身科研素质和解决实际问题的能力。

三、实验教学内容及教学方法

化工原理基础实验课程的内容主要包括实验理论教学和实验操作两大部分。实验理论教学主要讲述实验原理、实验设备的结构及用途、实验方法、实验操作步骤、实验过程中应记录的数据、实验注意事项和数据处理方法。

实验操作部分主要包括流体输送及其测量、传热、吸收、精馏、过滤、干燥及萃取等单元操作的实验内容,通过具体的实验操作,使学生掌握科学的实验方法。此过程具体包括:① 实验前的预习;② 实验准备;③ 具体的实验操作;④ 正确记录实验数据和处理实验结果;⑤ 进行实验结果的误差分析;⑥ 撰写实验报告等。以上各个环节都是实验课程的基本内容,认为实验课程就是单纯地进行实验操作的理念应该转变。

为使学生对化工原理基础实验有严肃的态度和严谨的作风,化工原理基础实验的程序要求如下。

(1) 认真阅读实验教材和有关的参考资料,了解实验目的和实验的基本要求。

(2) 对于所进行的实验项目,实验小组应进行讨论预习,拟定好实验方案,并写出预习报告。预习报告的内容主要包括:

- ① 实验名称及实验目的;
- ② 实验基本原理和实验方法;
- ③ 实验装置的构造及流程图;
- ④ 实验操作要点及实验数据的测量范围;
- ⑤ 设计原始实验数据记录表格。

实验预习报告应在实验前交给实验指导教师审阅,获准后学生方可进行实验操作。

(3) 进入实验室现场,听取实验指导教师的实验理论讲解后,实验小组应进行仔细的现场讨论,了解实验装置的具体结构,弄清实验流程、操作控制点和实验测量点的选取。另外,还要熟练掌握检测仪器的实验操作方法和实验注意事项。

(4) 进行实验操作时,应严格按照实验装置的使用要求进行,认真仔细地记录实验原始数据。实验操作中多进行理论联系实际的思考,分析判断实验过程中出现误差的原因。

(5) 对于实验数据的处理,应按照实验报告的要求进行。若利用计算机进行实验数据的处理,则还要有一组实验数据进行手算的计算示例。

(6) 撰写实验报告。撰写实验报告是实验教学的重要组成部分,应由学生独立完成。实验报告的内容主要包括:

- ① 实验名称及实验目的;
- ② 简明扼要的实验原理;
- ③ 实验装置及实验操作方法;
- ④ 实验注意事项;
- ⑤ 原始实验数据及实验数据的处理(以一组实验数据为例列出计算过程);
- ⑥ 实验误差分析。

四、化工实验安全知识

在实验室进行实验操作时,安全是非常重要的。实验过程中常潜藏着如发生爆炸、着火、中毒、触电等事故的危险性,如何防止这些事故的发生以及发生时应如何进行急救都是实验操作者必须具备的素质。下面主要结合化工实验的特点,介绍安全用电以及使用化学品的安全防护等知识。

1. 安全用电常识

违章操作常常可能造成人员伤亡、火灾及损坏实验设备等严重事故。化工实验室使用的电器设备较多,特别要注意安全用电,实验操作过程中一定要注意遵守实验安全规则。

(1) 防止触电。

- ① 不要使用潮湿的接触电器。
- ② 电源裸露部分应有绝缘装置(如电线接头处应裹上绝缘胶布)。
- ③ 所有电器的金属外壳都应保护接地。
- ④ 实验操作时,应先接好电路再接通电源;实验结束时,应先切断电源再拆开电路。
- ⑤ 安装和维修电器时必须先切断电源。
- ⑥ 禁止用试电笔去试高压电,使用高压电源时应有专门的保护措施。
- ⑦ 若有人触电,应迅速切断电源,然后再进行抢救。

(2) 防止引起火灾。

① 实验设备所使用的保险丝应与实验室允许的用电量相符。

② 电线的安全通电量应大于实验设备用电的功率。

③ 若实验室内有氢气、煤气等易燃、易爆气体,则应避免产生电火花。继电器工作时和开启电闸时易产生电火花,应特别小心。电器接触点接触不良时,应及时修理或更换。

④ 如果电线或电器起火,则应立刻切断电源,利用沙土或二氧化碳灭火器、四氯化碳灭火器灭火,严禁使用水或泡沫灭火器等导电液体灭火。

(3) 防止短路。

① 电路中的各种接点要牢固;电路元件两端接头不要相互接触,以防短路。

② 实验装置和电线不要被水淋湿或浸在导电溶液中。

(4) 电器仪表的安全使用。

① 电器设备使用前,应先了解电器仪表要求使用的电源是交流电还是直流电,是三相电还是单相电以及电压的大小(如 380 V, 220 V, 110 V 或 6 V);弄清楚电器设备的功率要求以及直流电器仪表的正负极。

② 电器仪表的量程必须大于实验测量值;若需要测定的数值不明确,则应从最大量程开始测量。

③ 实验测定开始之前应检查线路连接是否正确,经实验指导教师检查同意后方可接通电源开始实验操作。

④ 若实验设备及电器仪表在实验操作过程中发出不正常的响声、局部温度迅速升高或闻到绝缘漆过热产生的焦味,应立刻切断电源,并及时报告实验指导教师进行检查处理。

2. 使用化学药品的安全防护

(1) 防毒。

① 实验操作前应了解所使用化学药品的性能、使用方法及防护措施。

② 实验操作有毒气体(如 H_2S , Cl_2 , NO_2 , 浓 HCl 和 HF 等)时应在通风橱内进行。

③ 苯、四氯化碳、乙醚、硝基苯等的蒸气会引起中毒,久嗅会使人的嗅觉减弱,所以应在通风良好的情况下使用。

④ 有些药品(如苯、有机溶剂、汞等)能透过皮肤进入人体,应避免与皮肤接触。

⑤ 剧毒实验药品(如氰化物、高汞盐、三氧化二砷等)应妥善保管,使用过程中要特别小心。

⑥ 禁止在实验室内喝水、吃东西,饮食用具不要带入实验室,以防被毒物污染,离开实验室及饭前要充分洗净双手。

(2) 防火。

① 许多有机溶剂(如乙醚、丙酮、乙醇、苯等)非常容易燃烧,实验过程中大量使用时实验室内不能有明火、电火花或静电放电。实验室内不可存放过多这类药品,使用后要及时回收处理,不可倒入下水道,以免聚积引起火灾。

② 有些化学物质(如磷、金属钠和钾、电石及金属氢化物等)在空气中容易氧化自燃,有些金属粉末(如铁、锌、铝等粉末)比表面积大,也容易在空气中氧化自燃,对这些物质要隔绝空气保存,使用时要特别注意保护。

如果实验室内着火,不要惊慌,应根据发生火灾的实际情况和起火原因进行灭火,常用

的灭火剂有水、干沙、二氧化碳灭火器、四氯化碳灭火器、泡沫灭火器和干粉灭火器等。以下几种情况不能使用水进行灭火：

- ① 金属钠、钾、镁、铝粉，电石，过氧化钠等着火时，应用干沙灭火；
- ② 比水轻的易燃液体（如汽油、苯、丙酮等）着火时，应用泡沫灭火器灭火；
- ③ 有灼烧的金属或熔融物着火时，应用干沙或干粉灭火器灭火；
- ④ 电器设备或带电系统着火时，应用二氧化碳灭火器或四氯化碳灭火器灭火。

(3) 防灼烧。

强酸、强碱、强氧化剂、溴、磷、钠、钾、苯酚、冰醋酸等都会腐蚀皮肤，实验过程中要特别小心，防止溅入眼内；液氧、液氮等低温物质也会严重灼烧皮肤，使用时要小心。实验过程中若不慎灼烧，应立刻进行医治。

3. 汞的安全使用

化工实验室用到汞的地方较多，U形管压强计及单管型压强计中的指示液均为汞，实验过程中不要碰撞玻璃U形管压强计，以免汞撒落而引起汞中毒。汞中毒分为急性和慢性2种：急性汞中毒多为高汞盐（如 HgCl_2 入口，0.1~0.3 g即可致死）所致；吸入汞蒸气会引起慢性汞中毒，症状有食欲不振、恶心、便秘、贫血、骨骼和关节疼、精神衰弱等。汞蒸气的最大安全质量浓度为 0.21 mg/m^3 ，而在 20°C 时汞的饱和蒸气压为 0.0012 mmHg （ $1 \text{ mmHg}=133.3 \text{ Pa}$ ），此时浓度超过安全浓度100倍，所以使用汞时必须严格遵守安全用汞的操作规定。

安全用汞的操作规定如下：

- (1) 不要让汞直接暴露在空气中，盛汞的容器内应在汞表面加一层水覆盖；
- (2) 装汞时仪器下面必须放置浅瓷盘，防止汞滴散落到桌面和地面上；
- (3) 一切转移汞的操作应在浅瓷盘内进行；
- (4) 实验开始前要检查装汞的仪器是否放置稳固，接口处是否牢固；
- (5) 储汞容器要用厚壁玻璃器皿或瓷器，使用烧杯暂时盛汞时不可多装以防止破裂；
- (6) 若有汞撒落在桌面或地面上，应先用吸汞管尽可能地将汞珠收集起来，然后用硫磺盖在汞撒落的地方，并摩擦使之生成 HgS ，也可使用 KMnO_4 溶液使其氧化；
- (7) 擦过汞或汞齐的滤纸或抹布必须放入有水的瓷缸内，最后统一处理；
- (8) 盛汞的器皿和有汞的仪器应远离热源，严禁把有汞的仪器放入烘箱内加热烘烤；
- (9) 使用汞进行实验操作时，实验室内应有良好的通风设备，纯化汞应使用专门的实验室；
- (10) 手上有伤口时，切勿接触汞。

4. 气体钢瓶的使用

(1) 钢瓶上安装好配套的减压阀，检查减压阀是否关紧，方法为逆时针旋转调压手柄至螺杆松动；

- (2) 打开钢瓶总阀门（逆时针为开），此时高压表显示出钢瓶内的总压力；
- (3) 慢慢地顺时针转动调压手柄，至低压表显示出实验所需压力；
- (4) 停止使用时，先关闭气体钢瓶总阀门，待减压阀内的余气逸尽后再关闭减压阀。

5. 气体钢瓶使用注意事项

- (1) 气体钢瓶应放在阴凉、干燥、远离热源的地方，其中可燃性气体钢瓶应与氧气钢瓶

分开存放。

- (2) 搬运气体钢瓶时应先旋上钢瓶帽,然后小心搬运,轻拿轻放。
- (3) 使用前应先安装减压阀和压力表,可燃性气体(如 H_2 , C_2H_2)钢瓶气门螺丝为反丝,不燃性气体(如 N_2)或助燃性气体(如 O_2)钢瓶为正丝,各种压力表一般不可混用。
- (4) 不要让油污或易燃有机物沾染气体钢瓶。
- (5) 开启钢瓶阀门时,不要将头部或身体正对总阀门,防止阀门和压力表内气体冲出伤人。
- (6) 不要将气体钢瓶内的气体完全用完,以防重新充气时发生危险。
- (7) 使用中的气体钢瓶应每三年检查一次,装腐蚀性气体的钢瓶应每两年检查一次,不合格的气体钢瓶不可继续使用。
- (8) 氢气钢瓶应放置在远离实验室的专用小屋内,用紫铜管接入实验室,并安装防止回火的装置。

6. 我国气体钢瓶常用标记

我国气体钢瓶常用标记见表 1-1。

表 1-1 我国气体钢瓶常用标记

气体类别	瓶身颜色	标字颜色	字 样
氮 气	黑	黄	氮
氧 气	天 蓝	黑	氧
氢 气	深 绿	红	氢
压缩空气	黑	白	压缩空气
二氧化碳	黑	黄	二氧化碳
氨	草 绿	白	氨
乙 炔	白	红	乙 炔
氟氯烷	铝 白	黑	氟氯烷
纯氩气	灰	绿	纯 氩

第二章 化工实验基础知识

第一节 实验数据处理与测量误差分析

化学科学研究是以实验为基础的,在实验过程中需要测量大量的实验数据,并对其进行分析和计算,再整理成图表、经验模型或公式。为保证实验结果的准确性和可靠性,需要正确地测量、处理和分析这些数据,而在处理实验数据过程中难免会出现误差,所以需要了解和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少误差。

一、实验数据读取与有效数字

(一) 实验数据的读取

在实验中,无论是直接测量的数据还是计算结果,用几位有效数字加以表示是一项很重要的事情。实验数据的准确度取决于有效数字的位数,而有效数字的位数又由仪器仪表的精确度(简称精度)来决定。换言之,实验数据的有效数字位数必须反映仪表的精度和存在疑问的数字位置。

1. 实验数据的采集

(1) 对于稳态过程,一定要在过程达到稳定后才能读取数据,以保证采集数据的可靠性;对于非稳态过程,应按实际情况规划好读数的时间和位置,取同一瞬时值。

(2) 注意所采集数据点的适宜分布。变量间呈线性关系时,采集的数据点可均匀分布;若非线性关系,则在变化缓慢时少取数据点,反之多取数据点。应注意避免由于取点疏密不当而漏失了变化过程中的“拐点”。

(3) 注意实验仪表的指示量程和单位分度。

(4) 在同样条件下,实验数据一般至少读取 2 次,以达到自检目的。

(5) 采集的数据应及时复检,运用所学知识及时判定数据或趋势的合理性,若发现异常,应及时采取措施排除。

2. 实验数据的分类

在化工实验中,经常会遇到以下 2 类数据。

(1) 无量纲数据。

这类数据均没有量纲,如圆周率(π)、自然对数(e),以及一些经验公式的常数和指数值。对于这类数据的有效数字,其位数在选取时可多可少,通常依据实际需要而定。

(2) 有量纲数据。

在实验过程中,所测量的数据大多属于这一类,如压力(p)、速度(v)和温度(T)等。这类数据除具有特定单位外,其最后一位数字通常由测量仪表的精度决定。这类数据可利用直接测量和间接测量 2 种方法得到。

① 直接测量时有效数字的读取。

直接测量值的有效数字位数取决于测量仪表的精度。测量时,一般有效数字的位数可保留到测量仪表最小刻度的后一位,这最后一位即估计数字。例如,温度计最小刻度是 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,则有效数字的最后一位可取 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下一位数,如 $15.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,有效数字位数是 3 位。若读数恰好是 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,则应记为 $15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,仍然是 3 位有效数字(不能记为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$)。在此,所记录的有效数字中只有最后一位是在一个最小刻度范围内估读出的,而其余几位数是从刻度上准确读出的。

② 间接测量时有效数字的读取。

实验过程中,当有些物理量难以直接测量时,可选用间接测量法。例如,测量水箱内流体的质量时,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管子的直径计算得到。通过间接测量得到的有效数字位数与其相关的通过直接测量得到的有效数字位数有关,其取舍方法服从有效数字的取舍规则。

(二) 有效数字的取舍规则

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表示的,有效数字的位数是除定位用的“0”以外的其余数字,用于指示小数点位数或定位的“0”不是有效数字。

必须注意, 70 g 不一定是 70.00 g ,它们的有效数字位数不同,前者为 2 位,后者为 4 位,而 0.070 虽然为 4 位数字,但有效数字位数仅为 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。其方法为:先将有效数字写出,再在第一个有效数字后面加上小数点,并用 10 的整数幂表示数值数量级。例如,若 $182\ 000$ 的有效数字位数为 4 位,则可以写成 1.820×10^5 ;若其只有 3 位有效数字,则可以写成 1.82×10^5 。

2. 有效数字的舍入规则

在数据计算过程中,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的第一位数字采取四舍五入的计算规则。在一些精度要求较高的场合可采用下面的方法:

(1) 若末尾有效数字后的第一位数字小于 5,则舍去。

(2) 若末尾有效数字后的第一位数字大于 5,则将末尾有效数字加 1。

(3) 若末尾有效数字后的第一位数字等于 5,则由末尾有效数字的奇偶而定,当其为偶数或 0 时,不变;当其为奇数时,则加 1(变为偶数或 0)。

例如,对下面几个数据保留 3 位有效数字,则有:

$$17.44 \rightarrow 17.4 \qquad 17.45 \rightarrow 17.4$$

$$17.47 \rightarrow 17.5 \qquad 17.55 \rightarrow 17.6$$

3. 有效数字的运算规则

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,此时就需将多

余的位数舍去,其运算规则如下。

(1) 在加减运算中,各数字所保留的小数点后的位数应与各数字中小数点后的位数最少的相一致。例如,将 13.65, 0.008 2, 1.632 相加,应写为:

$$13.65 + 0.01 + 1.63 = 15.29$$

(2) 在乘除运算中,各数字所保留的位数以原来各数字中有效数字位数最少的为准,所得结果的有效数字位数应与原来各数字中有效数字位数最少的相同。例如,将 0.012 1, 25.64, 1.057 82 相乘,应写为:

$$0.012\ 1 \times 25.6 \times 1.06 = 0.328$$

(3) 在对数计算中,所取对数位数与真数有效数字位数相同。

$$\lg 55.0 = 1.74$$

$$\ln 55.0 = 4.01$$

二、实验数据的测量误差

在实验过程中,由于实验方法和实验设备的不完善、周围环境的影响,以及测量仪表的精度和人的观察等方面的原因,测量值和真值间不可避免地存在着差异,这种差异称为误差。误差普遍存在于测量过程中。为了减少误差,必须对测量过程和实验过程中存在的误差进行研究。通过误差估算和分析,可以认清误差的来源及其影响,确定导致实验总误差的主要因素,从而在实验过程中正确组织实验,合理选用测量仪表和测量方法,减少产生误差的来源,提高实验的质量。

(一) 实验数据的真值

真值是指某物理量客观存在的确定值。由于误差存在的普遍性,通常真值是无法测量的,只是一个理想值。在分析实验测量误差时,一般用如下值替代真值。

1. 理论真值

这类真值是指可以通过理论证实而知的值。例如,平面三角形内角之和为 180° , 计量学中经国际计量大会决议的热力学温度单位——绝对零度等于 -273.15 K , 以及一些理论公式表达式和理论设计值等。

2. 相对真值

在某些过程(如化工过程)中常使用精度等级较高的测量仪表的测量值代替普通测量仪表的测量值,称为相对真值。例如,高精度的涡轮流量计测量的流量值相对于普通流量计测量的流量值而言是真值。

3. 平均值

平均值是指对某物理量经多次测量算出的平均结果,可用它代替真值。当然,测量次数无限多时,算出的平均值应该是很接近真值的。然而,实际上测量次数是有限的,所得的平均值只能说是近似地接近真值。

(二) 误差的表示方法

误差通常有 2 种表示方法,即绝对误差和相对误差。

1. 绝对误差

绝对误差(Δ)在理论上是指仪表测量值 x_i 和被测量真值 x_t 之间的差值,可表示为:

$$\Delta = x_i - x_t \quad (2-1-1)$$

在化工计算中,真值常用算术平均值 $\bar{x}$ 或相对真值代替,此时式(2-1-1)可写为:

$$\Delta = x_i - \bar{x} \quad (2-1-2)$$

2. 相对误差

绝对误差与真值的比值称为相对误差,即

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \quad (2-1-3)$$

绝对误差是有量纲的,而相对误差是无量纲的。除某些理论分析外,通常用精确度较高的标准仪表测量的值作为真值求算相对误差。

3. 引用误差

为了计算和划分仪表精度等级,规定用绝对误差与仪表测量范围(满刻度值)之比的百分数表示相对误差,称为引用误差。

$$\text{引用误差} = \frac{\text{仪表允许的最大绝对误差}}{\text{仪表测量范围的上限值} - \text{仪表测量范围的下限值}} \quad (2-1-4)$$

测量仪表的精度等级是国家统一规定的,按引用误差去掉百分号后的数值大小分成几个等级。目前我国生产的仪表常用的精度等级有 0.005, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0 等。例如,某台测温仪表的引用误差为 1.5%,则可认为该仪表的精度等级为 1.5 级,可用 1.5 表示。仪表的精度等级是衡量其质量优劣的重要指标之一。精度等级越低,表明该仪表的精度越高。0.05 级以上的仪表常用作标准表;对于工业现场使用的测量仪表,其精度大多是 0.5 级以下的。

(三) 误差的种类

1. 系统误差

系统误差是由某些固定不变的因素引起的。在一定条件下,对同一物理量进行多次测量时,其误差大小及正负符号保持恒定,或随条件改变按一定规律变化。

系统误差产生的原因有:

(1) 测量仪表方面的因素,如仪表设计上有缺点、零件制造不标准、安装不正确、未校准等。

(2) 环境因素,如外界温度、湿度和压力等。

(3) 测量人员的习惯。

总之,系统误差存在固定的偏向和确定的规律,在测量时,应尽力消除其影响。对于难以消除的系统误差,应设法确定或估计其大小,以提高测量的正确度。

2. 随机误差(偶然误差)

随机误差是一种随机变量,是由某些不易控制的因素造成的。在相同条件下进行多次测量时,其误差大小及正负符号是不确定的,即时大时小、时正时负,无固定大小和偏向。随机误差在一定条件下服从统计规律,其大小与测量次数有关。随着测量次数的增加,随机误

差可以减小,但不会消除。因此,多次测量值的算术平均值接近于真值。

3. 过失误差(粗大误差)

过失误差是与实际明显不符的误差,即由于实验人员粗心大意、过度疲劳或操作不正确导致的测错或读错带来的误差。这类误差往往与正常值相差很大,应在处理实验数据时加以剔除。

(四) 精密度和准确度

实验中测得的数据重复出现的程度称为精密度,测量值与真值之间的符合度称为准确度。精密度反映随机误差的大小,而准确度则反映随机误差和系统误差之间综合大小的程度。因此,精密度高,准确度不一定高;准确度高,精密度一定高。所以在实验中不应只满足于实验数据的重现性,更应关注数据的准确程度。

(五) 随机误差的正态分布

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,又称高斯(Gauss)误差分布,如图 2-1-1 所示。图中横坐标为随机误差,纵坐标为概率密度分布函数 y 。

正态分布具有如下特征:

(1) 单峰值。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。对于绝对值相等的误差,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物理量测量时,各误差 x_i 的算术平均值随测量次数增加而趋于零。

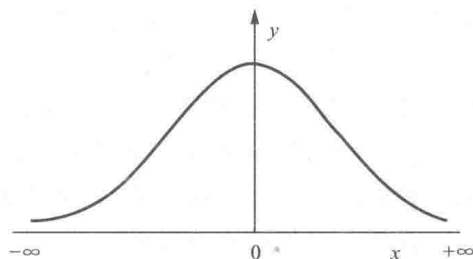


图 2-1-1 高斯误差分布

根据上述特性,可得误差出现的概率分布图(图 2-1-1),该曲线称为误差分布曲线,以 $y=f(x)$ 表示,曲线下方面积 $ydx=f(x)dx$ 为观测值的误差 x 出现的概率。观测值所有误差出现的概率为 1,即

$$\int_{-\infty}^{\infty} ydx = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad (2-1-5)$$

式中

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2-1-6)$$

式(2-1-6)即高斯在 1795 年提出的误差正态分布的概率密度分布函数。式中, σ 为标准误差,即对被测量进行 n 次测量后各误差平方的算术平均值的均方根:

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

式中 n ——一组测量值的测量次数;

x_i ——每次测得的随机误差(测量值—平均值)。

从式(2-1-7)不难看出, σ 可直接由测量数据算出,这样高斯误差分布定律更具有使用价