

高等教育规划教材

卓越 工程师教育培养计划系列教材
ZHUOYUE GONGCHENGSHI
JIAOYU PEIYANG JIHUA XILIE JIAOCAI

居沈贵 夏毅 武文良 © 编著

化工原理实验

HUAGONG YUANLI SHIYAN



化学工业出版社

高等教育规划教材

卓越 工程师教育培养计划系列教材

居沈贵 夏毅 武文良 编著

化工原理实验



化学工业出版社

· 北京 ·

《化工原理实验》是化工原理、食品工程原理、环境工程原理等相关课程的配套教材，注重培养学生综合素质，通过实验使学生掌握化工生产的单元操作技能以及实验研究方法。

本书内容包括五章：第一章化工原理实验基础知识，主要介绍化工原理实验概要、实验数据及测量误差、实验数据的处理方法、化工安全常识及实验安全要求；第二章测量仪表和测量方法，主要包括压力、流量、温度三大参数测量，以及实验常用传感技术、成分分析、显示仪表等；第三章化工原理基础实验，主要介绍化工原理各主要单元操作的演示、验证性实验与综合、设计性实验的实验装置、实验原理和实验操作方法，包括流体力学、泵性能、过滤、固体流态化、传热、吸收（解吸）、精馏、干燥；第四章化工原理提高性实验，包括萃取、吸附、膜分离、离子交换、惰性粒子流化床干燥等；第五章化工原理演示实验，包括流体流型、流体机械能分布及其转换、离心风机流化床降尘室旋风分离器、流体的压强及其测量、边界层、塔模型、热管换热器演示实验及化工原理仿真实验等。

《化工原理实验》可作为高等院校化工与制药类及相关专业化工原理实验课的教学用书，也可供化工、轻工、石油、食品、环境等领域科研、生产技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理实验/居沈贵等编著. —北京：化学工业出版社，
2016.9

卓越工程师教育培养计划系列教材 高等教育规划教材
ISBN 978-7-122-27547-9

I. ①化… II. ①居… 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 153039 号

责任编辑：杜进祥 丁建华
责任校对：王素芹

装帧设计：关 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 装：北京云浩印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 11¼ 字数 292 千字 2016 年 10 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：28.00 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的一个十分重要的实践性教学环节。教学目的是使学生加深理解和巩固化工单元操作的基本原理，熟悉和掌握各单元操作设备的工作原理、特性及使用方法，熟悉和掌握常见的化工仪表（如温度、压力或压差、流量等）的工作原理和使用方法。在实验中培养学生分析和解决化工过程中工程问题的能力，加强学生的动手能力，培养和提高学生的实验技能。化工原理实验力求成为培养学生的创新精神和实践能力、培养高素质复合型技术人才的基地。

本书共有五个章节。

第一章为化工原理实验基础知识，包含实验基础要求、实验误差分析、实验数据处理和安全规范等，以便学生对照这些要求正确地进行实验。

第二章为测量仪表和测量方法，介绍了化工实验及生产中常用测量仪表的工作原理及使用方法，如温度、压力和压差、流量和组成等的测量及操作，以及测量所用的传感器和智能仪表的工作原理及操作方法。

第三章为化工原理基础实验，共有七个实验，分别为流体力学实验、离心泵性能曲线测定实验、颗粒流体力学及机械分离实验、传热实验、填料吸收塔吸收（解吸）实验、精馏实验、干燥速率曲线测定实验。每个实验介绍了实验目的、实验原理、实验装置与流程、实验步骤及注意事项、实验报告要求和思考题、实验数据记录及数据处理结果示例，以便指导学生进行实验预习和操作。有些实验项目选取多种方案和不同的实验装置。

第四章为化工原理提高性实验，共有五个实验，包括液-液萃取实验、变压吸附制取富氧实验、无机膜分离实验、离子交换法制备纯水实验、惰性粒子流化床干燥实验。

第五章为化工原理演示实验，共有八个实验，分别为流体流型演示实验、流体机械能分布及其转换演示实验、离心风机流化床降尘室旋风分离器演示实验、流体的压强及其测量演示实验、边界层演示实验、塔模型演示实验、热管换热器演示实验及化工原理仿真实验，以供学生观察有关实验现象，加深对有关原理的理解。

最后为附录，收录了常用数据表，还收录了大学生实验竞赛试题示例，包括笔试和操作试题，并附有参考答案及评分标准。

本教材适用于实验时数为 30~40 学时的化工及其他相关专业的学生使用。各专业可根据各自的教学要求选取若干实验进行实验。一般多学时的专业选做 7~8 个实验，少学时的选做 4~6 个实验。每个实验应包括实验预习、实验操作、数据处理和实验报告编写等四个环节，每个学生都需认真完成。

本书主要由居沈贵、夏毅、武文良编著，但原始资料来自于南京工业大学化工原理教研室、实验室全体老师的多年积累，是大家共同的心血。

本书在编写过程中参考了管国锋等编写的《化工原理实验》及兄弟院校编写的各种教材、专著，并得到了学院领导和化工原理教研室、实验室各位老师，尤其是管国锋、蔡锐、王晟、冯晖、祝宁东、马华等的大力支持和帮助，编者在此深表感谢。

书中如有不妥和不足之处，敬请批评指正。

编者

2016年5月25日

目 录

第一章 化工原理实验基础知识	1	第六节 转速的测量	50
第一节 概述	1	一、概述	50
一、化工原理实验简介	1	二、测量方法	50
二、化工原理实验的基本要求	3	三、智能显示仪表	51
第二节 实验数据的误差分析	4	第七节 成分分析仪	52
一、误差的基本概念	5	一、气相色谱仪	52
二、误差的基本性质	7	二、奥氏分析仪	59
第三节 实验数据处理	13	三、二氧化碳液相浓度的气敏电极 分析法	60
一、有效数字的处理	13	第八节 控制器	63
二、实验结果的数据处理	14	一、温度控制器	63
第四节 化工原理实验安全	22	二、液位控制器	64
一、实验室安全教育管理规定	22	三、电动调节阀	68
二、实验室应急预案	22	四、变频器	70
第二章 测量仪表和测量方法	25	五、回流比控制装置	72
第一节 概述	25	第九节 智能仪表	74
一、仪表分类	25	一、智能仪表简介	74
二、测量控制过程	26	二、智能仪表结构	74
三、测量仪表的基本组成	26	三、智能仪表工作方式	75
第二节 压力测量	27	四、AI全通用人工智能调节器	75
一、液柱式压力计	27	第三章 化工原理基础实验	82
二、弹性式压力计	29	实验一 流体力学实验	82
三、电气式压力计	30	一、流体流动阻力测定实验	82
四、使用压力表应注意的问题	32	二、流体力学综合实验	87
第三节 流量测量	33	实验二 流体输送机械实验	90
一、差压式流量计	34	离心泵性能曲线测定实验	90
二、转子流量计	36	实验三 颗粒流体力学及机械分离实验	95
三、涡轮流量计	37	一、恒压过滤常数测定实验	95
四、湿式气体流量计	42	二、恒压过滤常数测定（真空抽滤） 实验	100
第四节 温度测量	43	三、固体流态化实验	102
一、膨胀式温度计	43	实验四 传热实验	106
二、热电阻温度计	44	一、对流给热系数测定实验	106
三、热电偶温度计	46	二、列管换热器传热实验	112
四、接触式温度计的安装	47	三、对流给热系数测定实验（双管）	114
第五节 功率测量	48	实验五 吸收实验	116
一、功率表测量法	48		
二、马达天平测量法	49		

填料吸收塔吸收实验	117	实验十五	离心风机流化床降尘室 旋风分离器演示实验	147	
实验六	精馏实验	122	实验十六	流体的压强及其测量 演示实验	148
实验七	干燥实验	127	实验十七	边界层演示实验	149
干燥速率曲线测定实验	127	实验十八	塔模型演示实验	151	
第四章 化工原理提高性实验	131	实验十九	热管换热器演示实验	153	
实验八	液-液萃取实验	131	实验二十	化工原理仿真实验	154
实验九	变压吸附制取富氧实验	134	附录	158	
实验十	无机膜分离实验	137	附录一	一些气体溶于水的亨利系数	158
实验十一	离子交换法制备纯水实验	138	附录二	某些二元物系的汽液平衡 组成	159
实验十二	惰性粒子流化床干燥 实验	141	附录三	乙醇溶液常见参数	160
第五章 化工原理演示实验	144	附录四	实验竞赛试题示例	161	
实验十三	流体流型演示实验	144	参考文献	174	
实验十四	流体机械能分布及其 转换演示实验	145			

第一章

化工原理实验基础知识

第一节 概述

化工原理是一门专业技术基础课，主要教学内容如图 1-1 所示。

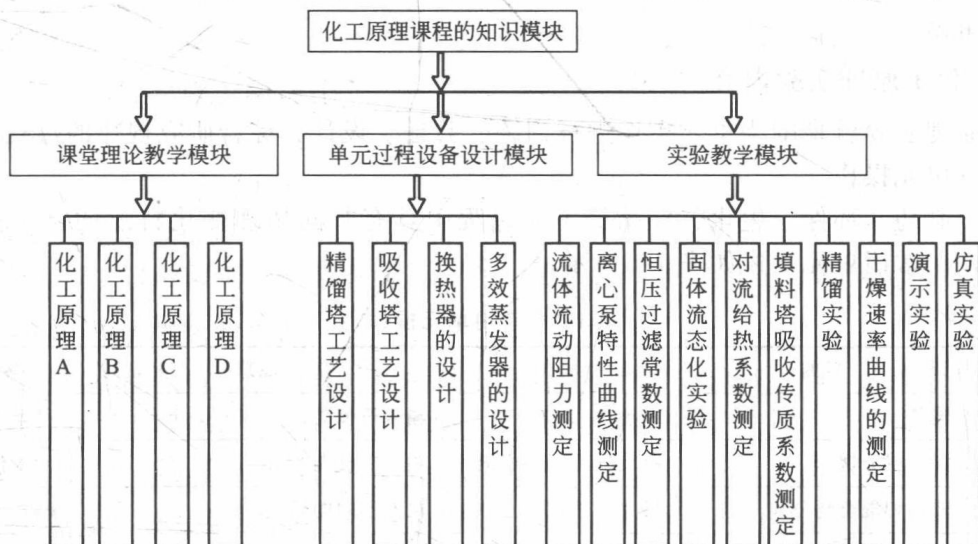


图 1-1 化工原理课程教学模块图

一、化工原理实验简介

(一) 实验教学设计思想

① 验证化工原理基本理论，并在运用理论对实验进行分析的过程中，使学生在理论知识方面得到进一步的理解和巩固；

② 通过实验操作，让学生掌握一定的实验研究方法和技巧，并培养学生实事求是的科学态度；

③ 通过对实验现象的观察、分析和讨论，培养和加强学生独立思考问题的能力，促进理论课的学习，培养学生的动手能力和思考分析能力。

(二) 实验教学目的

化工原理实验教学的目的主要有以下几点。

- ① 巩固和深化理论知识。
- ② 理论联系实际的应用。
- ③ 从事科学实验的能力培养。

包括：为了完成一定的课题，设计实验方案的能力；进行实验，观察和分析实验现象的能力，解决实验问题的能力；正确选择和使用测量仪表和控制方法的能力；利用实验的原始数据进行数据处理、获得科学结果的能力；书写技术报告的能力等。

- ④ 提高自身素质水平，培养思维方法的科学性、科学态度的严谨性。

(三) 组织形式与教师指导方法

① 每个实验前有 2 课时理论讲解，老师讲解实验目的、原理、流程、操作步骤、数据处理等，演示实验的全过程；

② 在进入实验室进行正式实验之前，学生必须利用业余时间至实验中心计算机房（或自备计算机上网）登录实验中心网站使用“化工原理实验多媒体教学课件”对化工原理实验进行学习和模拟操作，操作合格后网上测评合格方有资格进入实验室；

③ 进入实验室进行实验并现场进行实验数据的计算机结果认证，结果须经老师认可，不合格者须重做，此项过程基本时间 4h，重做者可另行预约时间；

④ 学生在实验后一周内完成实验报告并上交给指导教师，指导教师及时修改，不合格者须返回重做。

(四) 化工原理实验内容

化工原理实验就是围绕单元操作进行训练、验证、设计、综合研究规律的过程，实验内容包含所有单元操作。

化工、制药、环保、生化、食品等工业过程中具有共同物理变化特点的基本操作称为“单元操作”。常用单元操作如表 1-1 所示。

表 1-1 常用单元操作

单元操作	目的	物态	原理	传递过程
液体输送	输送	液或气	输入机械能	动量传递
搅拌	混合或分散	气-液；液-液；固-液	输入机械能	动量传递
过滤	非均相混合物分离	液-固；气-固	尺度不同的截留	动量传递
膜分离	非均相混合物分离	液-固；气-固	尺度不同的截留	动量传递
沉降	非均相混合物分离	液-固；气-固	密度差异引起的沉降运动	动量传递
加热、冷却	升温、降温，改变相态	气或液	利用温度差而传入或移出热量	热量传递
蒸发	溶剂与不挥发性溶质分离	液	供热以汽化溶剂	热量传递
气体吸收	均相混合物分离	气	各组分在溶剂中溶解度的不同	物质传递
萃取	均相混合物分离	液	各组分在溶剂中溶解度的不同	物质传递
液体精馏	均相混合物分离	液	各组分间挥发度的不同	物质传递
干燥	去湿	固体	供热汽化	热、质同时传递
吸附	均相混合物分离	液或气	各组分在吸附剂中的吸附能力不同	物质传递

(五) 化工原理实验考核

化工原理实验成绩可实行结构成绩制，分为四部分：

- ① 预习情况、仿真实验、现场提问、实验操作共占 25%。

② 实验报告质量占 25%。

③ 期末笔试成绩占 30%。

④ 面试占 20%。

考试包括实验方法、实验原理、实验设计、实验操作、数据处理、实验分析、工程实践等几方面的内容。

二、化工原理实验的基本要求

(一) 实验前的预习工作

① 阅读实验指导书，了解本实验的目的和要求。

② 根据实验的具体任务，掌握实验的理论根据和实验的具体做法，分析哪些参数需要直接测量得到，哪些参数不需要直接测量，而能够间接获得，并且要估计实验数据的变化规律。

③ 到实验室现场了解摸索实验流程，观看主要设备的构造、测量仪表的种类和安装位置，了解它们的测量原理和使用方法，最后全面审查整个实验流程的布置是否合理，审查主要设备的结构和安装是否合适，测量仪表的量程、精度是否合适，以及其所装位置是否合理。

④ 根据实验任务和现场勘查，最后规定实验方案，确定实验操作程序。

(二) 实验小组的分工和合作

化工原理实验一般是两人一组（板框压滤机操作需 3~4 人一组）合作进行的，因此实验开始前必须做好组织工作，做到既分工，又合作；既能保证质量，又能获得全面训练。每个实验小组要有一个组长负责执行实验方案、联络和指挥，与组员讨论实验方案，使得每个组员各司其职（包括操作、读取数据、记录数据及现象观察等），而且要在适当时候轮换工作。

(三) 实验必须测取的数据

凡是影响实验结果或数据整理过程中所必需的数据都必须测取，包括大气条件、设备有关尺寸、物料性质及操作数据等，但并不是所有数据都要直接测取的。凡可以根据某一数据导出或从手册中查出的其他数据，就不必直接测定。例如水的密度、黏度、比热容等物理性质，一般只要测出水温后即可查出，因而不是直接测定这些物理参量，而是测定水的温度。

(四) 实验数据的读取及记录

① 实验开始前拟好记录表格，在表格中应记下各次物理量的名称、表示符号及单位。每位实验者都应有一专用实验记录本，不应随便拿一张纸或实验讲义空白处来记录，要保证数据完整，条理清楚，避免记录错误。

② 实验时一定要等现象稳定后才开始读取数据，条件改变，要稍等一会才读取数据，这是因为条件的改变破坏了原来的稳定状态，重新建立稳态需要一定时间（有的实验甚至花很长时间才能达到稳定），而仪表通常又有滞后现象的缘故。

③ 每个数据记录后，应该立即复核，以免发生读错或记错数字等事故。

④ 数据的记录必须反映仪表的精确度。一般要记录到仪表上最小分度以下位数。例如温度计的最小分度为 1°C ，如果当时的温度读数为 20.5°C ，则不能记为 20°C ；又如果刚好是 20°C ，那应该记录为 20.0°C 。

⑤ 记录数据要以实验当时的实验读数为准。

⑥ 实验中如果出现不正常情况，以及数据有明显误差时，应在备注栏中加以说明。

（五）实验过程的注意点

有的实验者在做实验时，只读取数据，其他一概不管，这是不对的。实验过程中除了读取数据外，还应该做好下列诸事：

① 操作者必须密切注意仪表指示值的变动，随时调节，使整个操作过程都在规定条件下进行，尽量减少实验操作条件与规定操作条件之间的差距。操作人员要坚守岗位，不得擅自离岗。

② 读取数据后，应立即与前次数据比较，也要和其他有关数据相对照，分析相互关系是否合理，数据变化趋势是否合理。如果发现不合理，应该立即共同研究可能存在的原因，以便及时发现问题、解决问题。

③ 实验过程时还应注意观察过程现象，特别是发现某些不正常现象时更应抓住时机，研究产生不正常现象的原因，排除障碍。

（六）实验数据的整理

① 数据整理时应根据有效数字的运算规则，舍弃一些没有意义的数字。一个数字的精确度是由测量仪表本身的精确度所决定的，它绝不因为计算时位数增加而提高。但是任意减少位数也是不许可的，因为这样做就降低了应有的精确度。

② 数据整理时，如果过程比较复杂，实验数据又多，一般以采用列表整理为宜，同时应将同一项目一次整理。这种整理方法既简洁明了，又节省时间。

③ 计算示例。在②所列表的下面要给出计算示例，即任取一列数据进行详细的计算，以便检查。

（七）实验报告的编写

一份优秀的实验报告必须写得简洁明了，数据完整，交代清楚，结论正确，有讨论，有分析，得出的公式或曲线、图形有明确的使用条件。报告的内容一般包括：

- ① 报告的题目；
- ② 写报告人及同实验小组人员的姓名；
- ③ 实验的目的；
- ④ 实验的理论依据；
- ⑤ 实验设备说明（应包括流程示意图和主要设备、仪表的类型及规格）；
- ⑥ 实验数据，应包括与实验结果有关的全部数据，报告中的实验数据不是指原始数据，而是经过加工后用于计算的全部数据，至于原始记录则可作为附录附于报告后面；
- ⑦ 数据整理及计算示例，其中引用的数据要说明来源，简化公式要写出推导过程，要列出一列数据的计算过程，作为计算示例；
- ⑧ 实验结果，根据实验任务，明确提出本次实验的结论，用图示法、经验公式或列表法均可，但都必须注明实验条件；
- ⑨ 分析讨论，要对本次实验结果作出评价，分析误差大小及原因，对实验中发现的问题应作讨论，对实验方法、实验设备有何建议也可写入此栏。

第二节 实验数据的误差分析

实验数据的精确度直接标志着实验的质量和水平，而实验数据的精确度均取决于实验方法和个别实验条件的总和。后者又包括实验设备的现代化、所采用仪器的精密程度和灵敏度

以及周围环境和人的观察力等因素。由于上述因素均具有一定的局限性，所以测量和实验所得数值和真值之间，总存在一定差异，在数值上即表现为误差。因此，必须对实验的误差进行分析，确定导致实验总误差的最大组成因素，从而改善薄弱环节，提高实验的质量。

一、误差的基本概念

1. 真值与平均值

真值是一个理想的概念，一般是不能观测到的，但是若对某一物理量经过无限多次的测量，其出现误差有正也有负，而正负误差出现的概率是相同的。因此，假设不存在系统误差，它们的平均值就相当接近于该物理量的真值。所以在实验科学中定义：无限次观测的平均值为真值。由于实验工作中观测的次数总是有限的，有限次观测值得到的平均值，只能近似于真值，故称这个平均值为最佳值。

化工中常用的平均值有：

算术平均值

$$x_m = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1-1)$$

均方根平均值

$$x_s = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (1-2)$$

几何平均值

$$x_c = \sqrt[n]{x_1 x_2 \cdots x_n} = \sqrt[n]{\prod x_i} \quad (1-3)$$

式中 x_1, x_2, \cdots, x_n —— 观测值；
 n —— 观测次数。

计算平均值方法的选择，取决于一组观测值的分布类型。在一般情况下，观测值的分布属于正常类型，因此，算术平均值作为最佳值得用最为普遍。

2. 误差表示法

某测量点的误差通常由下面三种形式表示。

(1) 绝对误差

观测值与真值的差称为绝对误差，通称误差。但在实际工作中，以平均值（即最佳值）代替真值，观测值与最佳值之差称为剩余误差或绝对误差。

(2) 相对误差

为了比较不同被测量的测量精度而引入了相对误差。

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

(3) 引用误差

引用误差（或相对示值误差）指的是一种简化的实用方便的仪器仪表指示值的相对误差。它是以前仪器的满刻度示值为分母，某一刻度点示值误差为分子所得比值的百分数。

仪器仪表的精度用此误差来表示。比如 1 级精度仪表，即为 $\frac{\text{量程内最大示值误差}}{\text{满量程示值}} \times 100\%$ 等于 0.005、0.02 或 0.05。

在化工领域中，常用算术平均误差和标准误差来表示测量数据的误差。

① 算术平均误差

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_m|}{n} \quad (1-4)$$

式中 n ——观测次数；

x_i ——观测值；

x_m —— n 次观测的算术平均值。

② 标准误差 标准误差简称为标准差，或称均方根误差。当测定次数 n 为无穷时，其定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n}} \quad (1-5)$$

在有限观测次数中，标准误差常用下式表示：

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

标准误差 σ 的大小说明在一定条件下等精度测量列数据中每个观测值对其算术平均值的分散程度。如果 σ 的数值小，该测量列数据中相应小的误差占优势，任一单次观测值对其算术平均值的分散度就小，测量的精度就高；反之精度就低。

3. 误差的分类

误差按其性质和产生的原因可分为三类：系统误差、随机误差和过失误差。

(1) 系统误差

系统误差是指在同一条件下，多次测量同一量时，误差的数值和符号保持恒定，或在条件改变时，按某一确定的规律变化的误差。系统误差的大小反映了实测数据准确度的高低。

产生系统误差的原因：①仪器不良，如刻度不准，仪表未经校正或标准表本身存在偏差等；②周围环境的改变，如外界温度、压力、风速等；③实验人员个人习惯和偏向，如读数的偏高或偏低等所引起的误差。可针对上述诸原因，分别改进仪器和实验装置，以及提高实验技巧，予以消除系统误差。

(2) 随机误差（或称偶然误差）

在已经消除系统误差的前提下，随机误差是指在相同条件下测量同一量时，误差的绝对值时大时小，其符号时正时负，没有确定的规律的误差。随机误差的大小反映了精密程度的高低。这类误差产生原因无法预测，因而无法控制和补偿。但是倘若对一等量值作足够多次数的等精度测量时就会发现随机误差完全服从统计规律，误差的大小和正负的出现完全是由概率决定的。因此随着测量次数的增加，随机误差的算术平均值必趋近于零。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（或称粗大误差）

过失误差是一种显然与事实不符的误差，它主要是由于实验人员粗心大意，如读错数据或操作失误等所致。存在过失误差的观测值在实验数据整理时必须剔除，因此实验时，只要认真负责是可以避免这类误差的。

显然，实测列数据的精确程度是由系统误差和随机误差的大小来决定的。系统误差愈小，则列数据的准确度愈高；又随机误差愈小，则列数据的精确度愈高。所以要使实测列数

据的精确度高就必须满足系统误差和随机误差均很小。

二、误差的基本性质

实测列数据的可靠程度如何，怎样提高它们的可靠性，等等，这些都要求我们了解对给定条件下误差的基本性质和变化的规律。

1. 偶然（随机）误差的正态分布

如果测量数列中不包含系统误差和过失误差，从大量的实验中发现偶然误差具有如下特点：

- ① 绝对值相等的正误差和负误差，其出现的概率相同；
- ② 绝对值小的误差出现的概率大，而绝对值大的误差出现的概率小；
- ③ 绝对值很大的误差出现的概率趋近于零，也就是误差值有一定的实际极限；
- ④ 当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时，误差的算术平均值趋近于零。这是由于正负误差相互抵消的结果。这也说明在测定次数无限多时，算术平均值就等于测定量的真值。

偶然误差的分布规律，在经过大量的测量数据的分析后知道，它是服从正态分布的，其误差函数 $f(x)$ 表达式为

$$y = f(x) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-k^2 x^2} \quad (1-7)$$

或者

$$y = f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1-8)$$

式中， h 为精密指数， $h = \frac{1}{\sigma\sqrt{2}}$ ； x 为实测值与真值之差； σ 为均方误差。式(1-7) 或式

(1-8) 是高斯于 1795 年推导出的，因此，也称为高斯误差分布定律。根据此方程所画出的曲线则称为误差分布曲线或高斯正态分布曲线，如图 1-2 所示。横坐标， x 表示偶然误差，纵坐标 y 表示各误差出现的概率，此曲线为一对称形的曲线。此误差分布曲线完全反映了偶然误差的上述特点。

现在来考察一下 σ 值对分布曲线的影响。由式(1-8) 可见，数据的均方误差 σ 愈小， e 指数的绝对值就愈大， y 减小得就愈快，曲线下降得也就更急，而在 $x=0$ 处的 y 值也就愈大；反之， σ 愈大，曲线下降得就愈缓慢，而在 $x=0$ 处的 y 值也就愈小。图 1-3 对三种不同的 σ 值 ($\sigma=1$ 单位， $\sigma=3$ 单位， $\sigma=10$ 单位) 给出了偶然误差的分布曲线。

从这些曲线以及上面的讨论中可以明显地看出， σ 值愈小，小的偶然误差出现的次数就愈多，测定精度也就愈高；当 σ 愈大时，就会经常碰到大的偶然误差，也就是说，测定的精度也就愈差。因而实测列数据的均方误差 σ ，完全能够表达出测定数据的精确度，亦即表征着测定结果的可靠程度。

下面考察 h 对曲线的影响。

由式(1-7)，以 h 作参数进行标绘的曲线 (图 1-4) 可见：

- ① 对应于最小误差 ($x=0$) 的两边，曲线是对称的；
- ② 在纵轴 y 上具有一个最大概率点，这一点相当于误差 $x=0$ ；
- ③ 曲线两边逐渐与横轴接近。

将大、中、小 h 三条分布曲线绘在一张图上，如图 1-4 所示。由图可见， h 值大的曲线是奇峰突起的狭长曲线，这意味着实验的精密度高，因为小误差出现的概率极大。 h 值小的曲线低坦，这意味着实验的精密度较低，因为大小误差出现概率相差不明显。 h 值居中的，

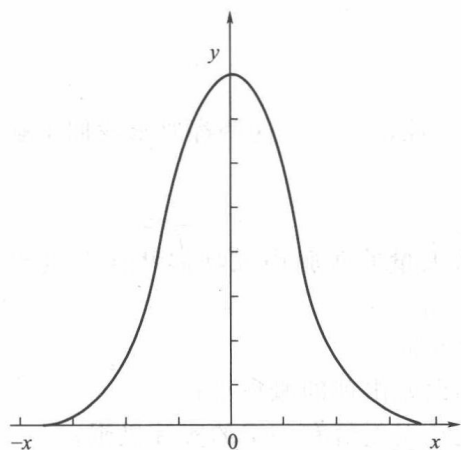


图 1-2 误差分布曲线 (高斯正态分布曲线)

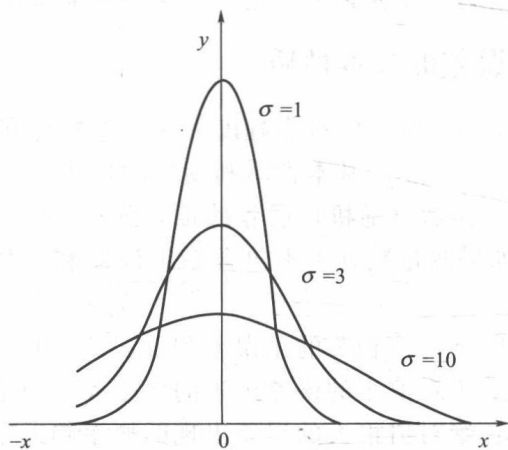


图 1-3 不同 σ 值时的误差分布曲线

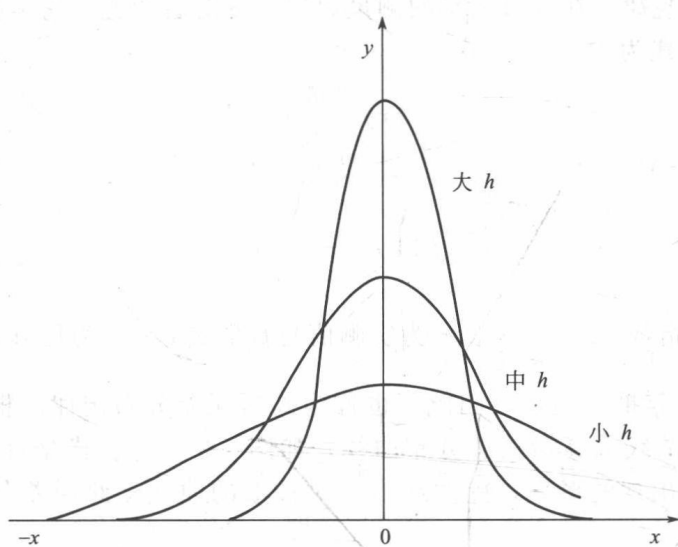


图 1-4 不同 h 值时的误差分布曲线

则表明实验精密度适中。

2. 可疑的实验观测值的舍弃

由概率积分知,偶然误差正态分布曲线下的全部面积,相当于全部误差同时出现的概率,即

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = 1 \quad (1-9)$$

若随机误差在 $-\sigma \sim +\sigma$ 范围内, 概率则为

$$P(|x| < \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\sigma}^{\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = \frac{2}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_0^{\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \quad (1-10)$$

令 $t = \frac{x}{\sigma}$, 则 $x = t\sigma$

所以

$$P(|x| < \sigma) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^1 e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (1-11)$$

若令

$$\phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

则

$$P(|x| < \sigma) = 2\phi(t)$$

即误差在 $\pm t\sigma$ 的范围内出现的概率为 $2\phi(t)$ ，而超出这个范围的概率则为 $1-2\phi(t)$ 。 $\phi(t)$ 称为概率函数。 $\phi(t)$ 与 t 的对应值，在数学手册或专著中均附有此类积分表，现给出几个典型的 t 值及其相应的超出或不超出 $|x|$ 的概率，见表 1-2 和图 1-5。

表 1-2 t 值及其相应的概率

t	$ x = t\phi$	不超出 $ x $ 的概率 $2\phi(t)$	超出概率 $ x $ $1-2\phi(t)$	测量次数 n	超出 $ x $ 的测量次数 n'
0.67	0.67σ	0.4972	0.5028	2	1
1	1σ	0.6826	0.3174	3	1
2	2σ	0.9544	0.0456	22	1
3	3σ	0.9973	0.0027	370	1
4	4σ	0.9999	0.0001	15626	1

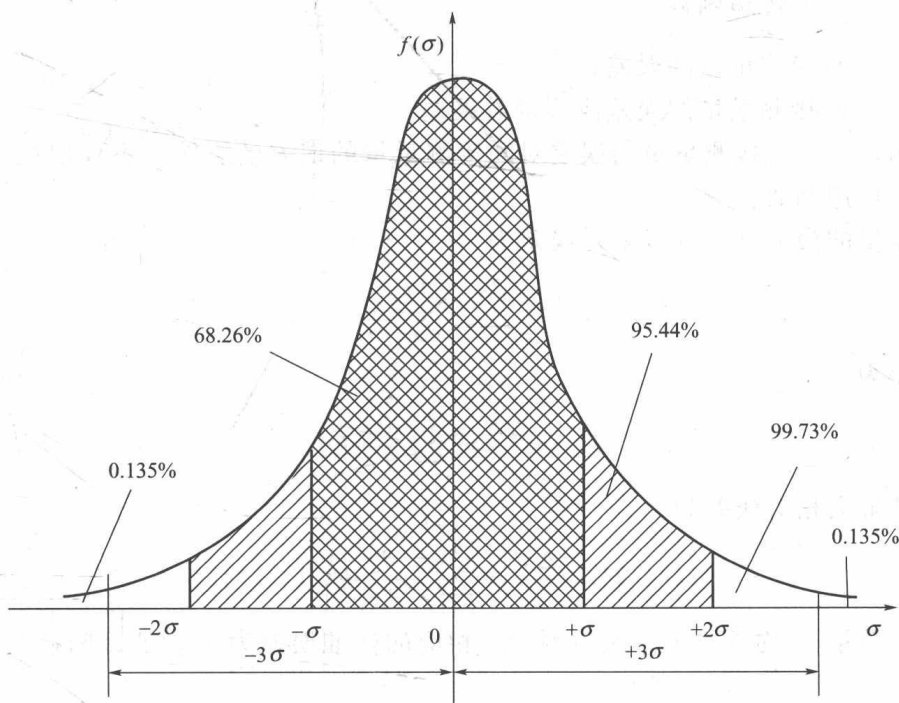


图 1-5 误差分布曲线的积分

由表 1-2 和图 1-5 可知，当 $t=3$ ， $|x| = 3\sigma$ 时，在 370 次观测中只有一次误差绝对值超出 3σ 范围。由于在一般测量中其次数不过几次或几十次，因而可以认为 $|x| > 3\sigma$ 的误差是不会发生的。通常把这个误差称为单次测量的极限误差，也称为 3σ 原则。由此认为， $|x| > 3\sigma$ 的误差已不属于偶然误差，这可能是由于过失误差或实验条件变化未被发觉引起的，这样的实验数据点经分析和误差计算以后应舍弃。

3. 间接测量值的误差

实验中一些量可以直接测得，如流体的压强、温度等；而另一些量不能直接测得，如流体流速、传热过程中的换热量，前者叫做直接测量量，后者叫做间接测量量。间接测量量是由直接测量量通过确定的函数关系计算出来的。前面讨论的主要是直接测量量的误差计算问

题, 既然直接测量量有误差, 这些误差必然会传递到间接测量量中去, 间接测量量也必然存在误差。

(1) 误差传递的基本公式

设间接测量量 y 是直接测量量 x_1, x_2, \dots, x_n 的函数, 即

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-12)$$

对上式求全微分

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n \quad (1-13)$$

将上式改为误差公式时, 式中的 dy, dx_1, dx_2, dx_n 均用 $\Delta y, \Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 代替, 即得绝对误差公式:

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (1-14)$$

或

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (1-15)$$

式中 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ —— 误差传递函数;

Δx_i —— 直接测量量的误差;

Δy —— 间接测量量的误差或称函数误差。

此式表明, 一个直接测量量的误差对间接测量量的误差的影响, 不仅取决于误差本身, 还取决于误差传递函数。

间接测量量的最大绝对 (极限) 误差为

$$\Delta y' = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right| \quad (1-16)$$

相对误差为

$$E_r = \frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} E_i \quad (1-17)$$

同理, 其最大相对误差为

$$E_r' = \frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} E_i \right| \quad (1-18)$$

如果每一总量 x_i 均进行了 n 次检测, 设相应的标准误差为 σ_i , 那么间接测量量 y 的标准误差为

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2} \quad (1-19)$$

(2) 简单函数的误差传递计算公式

① 设 $y = x \pm z$ 变量 x, z 的标准误差分别为 σ_x, σ_z

由于误差的传递系数:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = 1$$

$$\frac{\partial y}{\partial z} = \pm 1$$

则函数最大绝对误差为

$$\Delta y = |\Delta x| + |\Delta z| \quad (1-20)$$