

高等学校实验课系列教材

# 化工原理实验

(第二版)

H U A G O N G Y U A N L I S H I Y A N

● 汤秀华 杨 郭 主编  
● 杨 虎 马 燮 主审



EXPERIMENTATION



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

# 化工原理实验

(第二版)

汤秀华 杨 郭 主 编  
杨 虎 马 燮 主 审

重庆大学出版社

## 内 容 提 要

本书是按专业大类建立的化工类专业实践课程体系的系列教材之一。主要包括3部分内容,即实验误差与数据处理、参数测量技术和实验部分。在实验误差与数据处理中,介绍了误差与精度、有效数字与数据运算、数据处理、Origin在实验数据处理中的应用等。在参数测量技术中,介绍了温度、压强、流量、功率、组成等参数的测量原理及仪器仪表的选用。在实验部分中,介绍了化工原理实验的基本要求、化工原理的基础实验和综合设计实验。

本书适用于高等院校化工及相关专业学生作为工程基础实践课程教材,也可作为化工、石油、食品、医药、环境工程等领域从事生产的技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验/汤秀华,杨郭主编.—2版.—重庆:  
重庆大学出版社,2014.12

高等学校实验课系列教材  
ISBN 978-7-5624-8522-3

I.化… II.①汤…②杨… 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(2014)第183720号

## 化工原理实验

(第二版)

汤秀华 杨 郭 主 编

杨 虎 马 夔 主 审

责任编辑:鲁 黎 版式设计:鲁 黎

责任校对:关德强 责任印制:赵 晟

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路21号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:[fxk@cqup.com.cn](mailto:fxk@cqup.com.cn)(营销中心)

全国新华书店经销

重庆川外印务有限公司印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:7.5 字数:187千

2014年12月第2版 2014年12月第4次印刷

ISBN 978-7-5624-8522-3 定价:15.50元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

# 第二版 前言

本书是 2008 版《化工原理实验》的修订版,在前一版的基础上,根据实验设备的更新情况进行修订和内容补充。本版主要对第 3 章进行了修改补充,使教材和设备配套,同时满足不同专业学生对实验教学的不同需求。

本书共分 3 章。第 1 章为实验误差和数据处理,主要介绍实验误差的来源分类、实验数据运算的基本原则、实验结果的表达和 Origin 在实验数据处理分析中的应用。第 2 章为参数测量技术,主要介绍化工过程中涉及的温度、压力、流量、组成等参数的测量方法、常用测量仪表和仪器、仪表选用与安装的基本原则。第 3 章为实验部分,主要涉及动量传递、热量传递和质量传递的典型单元操作等实验项目。

本书适用于高等院校化工及相关专业学生作为工程基础实践课程教材,也可作化工、石油、食品、医药、环境工程等领域从事生产技术人员的参考书。

本书由杨虎、马燮教授审阅,同时得到了陈虹、李明愉和周宇老师的大力帮助,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,编写时间仓促,本书的欠缺之处,欢迎读者批评指正。

编者

2014 年 8 月

# 前言

化工原理实验是培养化工类及相关专业学生的工程观念和工程实践能力的重要实践性课程。地方性工科院校培养的应用型工程技术人才不仅具有扎实的理论基础,还应具备娴熟的实验技能、较强的工程实践能力和创新精神。根据按专业大类构建化工类专业实践课程体系的指导思想,化工原理实验是化工类专业实践课程体系中专业基础实验平台中的重要模块。化工原理实验的目的是培养学生工程实验的设计、组织实施、实验操作、数据处理等工程实践能力。因此,化工原理实验在培养高素质的化工类应用型工程技术人才中具有十分重要的作用。

化工原理实验属于工程实验范畴,所涉及的研究对象均是复杂的化工过程实际问题,因此在处理问题的方法上具有鲜明的工程特点。化学工程学科基础理论在长期的发展中,已形成了一系列研究处理工程实际问题的有效方法,而这些方法正是化学工程基础理论的精华。因此,如何通过化工原理实验使学生得到工程观念的培养和工程实验能力的训练,提高学生工程实践能力是编写本教材的目的。通过化工原理实验,应达到以下几个方面的教学要求:

①培养学生严肃认真、实事求是的科学工作态度和严谨的工作作风。

②使学生掌握工程问题的基本研究方法,培养学生的工程观念。

③培养学生的工程实践能力,包括工程实验设计的能力、正确选用仪器仪表的能力、流程组织能力、实验的组织实施能力、数据处理能力、归纳整理获取实验结果的能力、撰写技术报告的能力。

④培养学生的典型化工单元装置的基本操作技能。

为此,本书共分3章。第1章为实验误差和数据处理,主要介绍实验误差的来源分类、实验数据运算的基本原则、实验结果的表达和 Origin 在实验数据处理分析中的应用。第2章为参数测量技术,主要介绍化工过程中涉及的温度、压力、流量、组成等参数的测量方法、常用测量仪表和仪器、仪表选用与

安装的基本原则。第3章为实验部分,主要涉及动量传递、热量传递和质量传递的典型单元操作等14个实验项目。

本书适用于高等院校化工及相关专业学生作为工程基础实践课程教材,也可作化工、石油、食品、医药、环境工程等领域从事生产技术人员的参考书。

本书由李明愉博士和陈虹教授审阅,并提出宝贵意见,在此表示诚挚的感谢。

本书是配合实验体系改革的配套教材,编写工作是一个探索与研讨的过程,由于作者水平有限,编写时间仓促,本书的欠缺之处,欢迎读者批评指正。

编者

2008年1月

# 目 录

第1章 实验误差与数据处理 .....	1
1.1 误差与精度 .....	1
1.1.1 误差 .....	1
1.1.2 精度 .....	4
1.2 有效数字与数据运算 .....	5
1.2.1 有效数字 .....	5
1.2.2 数字舍入规则 .....	6
1.2.3 数据运算规则 .....	7
1.3 实验数据处理 .....	7
1.3.1 实验结果的表示方法 .....	7
1.3.2 实验数据拟合原理与方法 .....	10
1.4 Origin 在实验数据处理中的应用 .....	13
1.4.1 Origin 基础 .....	13
1.4.2 绘制二维图形 .....	14
第2章 参数测量技术 .....	21
2.1 温度测量技术 .....	21
2.1.1 玻璃管液体温度计 .....	22
2.1.2 热电偶温度计 .....	24
2.1.3 热电阻温度计 .....	29
2.1.4 各类温度计的比较与选用 .....	32
2.2 压强测量技术 .....	34
2.2.1 基本概念 .....	34
2.2.2 液柱式压差计 .....	34
2.2.3 弹性式压力计 .....	38
2.2.4 应变式压力传感器 .....	40
2.2.5 压力表的选用与安装 .....	41
2.3 流量测量技术 .....	43
2.3.1 概述 .....	43

2.3.2	节流式流量计 .....	43
2.3.3	转子流量计 .....	50
2.3.4	涡轮流量计 .....	52
2.3.5	体积式测量方法 .....	54
2.3.6	流量计的校正 .....	56
2.4	功率测量技术 .....	56
2.4.1	马达天平测功仪 .....	56
2.4.2	功率表测功法 .....	57
2.5	成分测定 .....	58
2.5.1	化学方法 .....	59
2.5.2	物理法 .....	60
<b>第3章</b>	<b>实验部分</b> .....	<b>63</b>
3.1	化工原理实验基本要求 .....	63
3.1.1	实验预习 .....	63
3.1.2	实验操作注意事项 .....	63
3.1.3	实验报告的撰写 .....	64
3.2	基础实验 .....	65
3.2.1	实验1 流体流动类型观察与雷诺数的测定 .....	65
3.2.2	实验2 烟风流线 .....	67
3.2.3	实验3 流体机械能转换实验 .....	68
3.2.4	实验4 离心泵的气缚与气蚀实验 .....	70
3.2.5	实验5 气力输送与旋风分离实验 .....	73
3.2.6	实验6 填料塔流体力学特性实验 .....	75
3.2.7	实验7 流化床的特性测定 .....	76
3.2.8	实验8 板式塔的流体力学性能实验 .....	81
3.3	综合设计实验 .....	85
3.3.1	实验1 流体力学综合实验 .....	85
3.3.2	实验2 过滤实验 .....	92
3.3.3	实验3 对流传热系数的测定 .....	94
3.3.4	实验4 填料吸收塔的操作及传质性能的测定 .....	97
3.3.5	实验5 精馏设计实验 .....	101
3.3.6	实验6 精馏塔的操作与塔效率的测定 .....	102
3.3.7	实验7 干燥操作和干燥速度曲线的测定 .....	106
3.3.8	实验8 离心泵串并联实验 .....	108
	参考文献 .....	112



# 第 1 章

## 实验误差与数据处理

化学工程是利用自然科学的理论、方法来解决化工生产过程实际问题的工程性很强的一门学科,在石油化工、医药、环保、轻工、生化、冶金等行业都得到广泛应用。化学工程又是一门研究过程共性规律的学科,化工过程中涉及的化工热力学、化学反应工程、分离工程、传递现象、化工系统工程等是化学工程研究的主要内容,它以化工生产过程为研究对象。研究化工过程的内在规律,以解决如何实现从实验室研究到工业生产的问题。化学工程多采用实验研究法和数学模型研究法。由于建立数学模型所需的基础数据要依靠实验来测定、需要通过实验来鉴别模型或验证模型的可靠性,通过实验来求取模型参数,因此实验研究方法仍是化学工程研究中的重要方法,实验技能也是从事化学工程专业的人员所必须具备的技能之一。

### 1.1 误差与精度

在化工实验中,需要不断地对化工过程中的各种物理量进行测量和研究,由于实验方法和实验设备的不完善,周围环境的影响,以及受人们认识能力所限等,测量和实验所得数据和被测量的真实值之间,不可避免地存在着差异,这在数值上即表现为误差。随着科学技术的日益发展和人们认识水平的不断提高,虽可将误差控制得愈来愈小,但终究不能完全消除它。误差存在的必然性和普遍性,已为大量实践所证明,为了充分认识并进而减小误差,必须对测量过程和科学实验中始终存在着的误差进行研究。研究误差的意义是为了正确认识误差的性质,分析误差产生的原因,以减小误差;正确处理测量结果和实验数据,合理计算所得实验结果,以便在一定条件下得到更接近于真实值的数据;正确组织实验过程,合理设计仪器或选用仪器和测量方法,以便在最经济条件下,得到理想的结果。

#### 1.1.1 误差

##### (1) 误差的定义及其表示方法

误差是指测得值与被测量的真实值之间的差值,可用式(1.1)表示。

$$\text{误差} = \text{测得值} - \text{真实值} \quad (1.1)$$

例如在长度计量测试中测量某一尺寸的误差的具体形式可用式(1.2)表示。

$$\text{误差} = \text{测得尺寸} - \text{真实尺寸} \quad (1.2)$$

测量误差既可用绝对误差表示,也可用相对误差表示。

### 1) 绝对误差

绝对误差是指某量值的测得值和真实值之差,通常简称为误差。

$$\text{绝对误差} = \text{测得值} - \text{真实值} \quad (1.3)$$

由式(1.3)可知,绝对误差可能是正值或负值。

真实值是指在观测一个量时,该量本身所具有的真实大小。量的真实值是一个理想的概念,一般是不知道的。但在某些特定情况下,真实值又是可知的。如三角形三个内角之和为 $180^\circ$ ,一个整圆周角为 $360^\circ$ ,按定义规定的国际千克基准的值可认为真实值是 $1\text{ kg}$ 等。为了使用上的需要,在实际测量时,常用被测量的实际值来代替真实值,而实际值的定义是满足规定精确度的用来代替真实值使用的量值。例如在检定工作中,把高一等级精度的标准所测得的量值称为实际值。如用二等标准压力计测量某压力,测得值为 $210.6\text{ kPa}$ ,若该压力用高一等级的精确方法测得值为 $210.8\text{ kPa}$ ,则后者可视为实际值,此时二等标准压力计的测量误差为 $-0.2\text{ kPa}$ 。

在实际工作中,经常使用修正值。为消除系统误差用代数法加到测量结果上的值称为修正值,将测得值加上修正值后可得近似的真实值,即

$$\text{真实值} = \text{测得值} + \text{修正值} \quad (1.4)$$

因此

$$\text{修正值} = \text{真实值} - \text{测得值} \quad (1.5)$$

修正值与误差值的大小相等符号相反,测得值加修正值后可以消除该误差的影响。但必须注意,一般情况下难以得到真实值,因为修正值本身也有误差,修正后只能得到较测得值更为准确的结果。

### 2) 相对误差

相对误差是绝对误差与被测量的真实值之比值。由于测得值与真实值接近,相对误差也可以用绝对误差与测得值之比来表示,即

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真实值}} \approx \frac{\text{绝对误差}}{\text{测得值}} \quad (1.6)$$

由于绝对误差可能为正值或负值,因此相对误差也可能为正值或负值。

相对误差是无名数,通常以百分数(%)来表示。例如用水银温度计测得某一温度为 $20.3\text{ }^\circ\text{C}$ ,该温度用高一等级的温度计测得值为 $20.2\text{ }^\circ\text{C}$ ,因后者精度高,可认为 $20.2\text{ }^\circ\text{C}$ 更接近真实温度,而水银温度计测量的绝对误差为 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ ,其相对误差为

$$\frac{0.1}{20.2} \approx \frac{0.1}{20.3} = 0.5\%$$

对于相同的被测量,绝对误差可以评定其测量精度的高低,但对于不同的被测量,绝对误差就难以评定其测量精度的高低,而采用相对误差来评定较为准确。如用两种方法来测量 $L_1 = 100\text{ mm}$ 的尺寸,测量误差分别为 $\delta_1 = \pm 10\text{ }\mu\text{m}$ , $\delta_2 = \pm 8\text{ }\mu\text{m}$ 。根据绝对误差大小,可知后者的测量精度高。但若用第三种方法测量 $L_2 = 80\text{ mm}$ 的尺寸,其测量误差为 $\delta_3 = \pm 7\text{ }\mu\text{m}$ ,此时用绝对误差就难以评定它与前两种方法精度的高低,必须采用相对误差来评定。

第一种方法的相对误差为 $\frac{\delta_1}{L_1} = \pm \frac{10}{100\ 000} = \pm 0.01\%$ ,第二种方法的相对误差为 $\frac{\delta_2}{L_2} =$

$\pm \frac{8}{100\ 000} = \pm 0.008\%$ , 第三种方法的相对误差为  $\frac{\delta_3}{L_3} = \pm \frac{7}{80\ 000} = \pm 0.009\%$ 。由此可知, 第一种方法精度最低, 第二种方法精度最高。

### 3) 引用误差

引用误差是一种简化和实用方便的仪器表示值的相对误差, 它是以仪器仪表某一刻度点的示值误差为分子, 以测量范围上限值或全量程为分母, 所得的比值称为引用误差, 即

$$\text{引用误差} = \frac{\text{示值误差}}{\text{测量范围上限}} \quad (1.7)$$

如测量范围上限为 10 MPa 的压力表, 在标定示值为 4 000 kPa 处的实际压力为 4 024 kPa, 则此压力表在该刻度点的引用误差为  $\frac{4\ 000 - 4\ 024}{10\ 000} = \pm 0.24\%$ 。

## (2) 误差来源

在测量过程中, 误差产生的原因可归纳为以下 4 个方面。

### 1) 测量装置误差

测量装置误差主要由标准量具误差、仪器误差、附件误差构成。

标准量具误差是指以固定形式复现标准量值的器具所包含的误差, 如标准量块、标准线纹尺、标准电阻、标准砝码等, 它们本身体现的量值, 不可避免地都含有误差。凡用来直接或间接将被测量和已知量进行比较的器具设备, 称为仪器或仪表, 仪器仪表本身包含的误差称为仪器误差, 如阿贝折射仪、天平、压力表、温度计等仪器仪表, 它们自身都含有误差。附件误差是指由仪器的附件或附属工具引入的误差。

### 2) 环境误差

由于各种环境因素与规定的标准状态不一致而引起的测量装置和被测量本身的变化所造成的误差, 如温度、湿度、气压(引起空气各部分的扰动)、振动(外界条件及测量人员引起的振动)、照明(引起视差)、重力加速度、电磁场等所引起的误差。通常仪器仪表在规定的正常工作条件所具有的误差称为基本误差, 而超出此条件时所增加的误差称为附加误差。

### 3) 方法误差

由于测量方法不完善所引起的误差, 如采用近似的测量方法而造成的误差, 例如用钢卷尺测量轴的圆周长  $s$ , 再通过计算求出轴的直径  $d = s/\pi$ , 因近似数  $\pi$  取值的不同, 将会引起误差。

### 4) 人员误差

由于测量者受分辨能力的限制, 因工作疲劳引起的视觉器官的生理变化, 固有习惯引起的读数误差, 以及精神上的因素产生的一时疏忽等所引起的误差。

总之, 在计算测量结果的精度时, 对上述四个方面的误差来源, 必须进行全面的分析, 力求不遗漏、不重复, 特别要注意对误差影响较大的那些因素。

## (3) 误差分类

按照误差的特点与性质, 误差可分为系统误差、随机误差(也称偶然误差)和粗大误差三类。

### 1) 系统误差

系统误差是指在规定的测量条件下多次测量同一量值时, 误差的数值和符号保持恒定, 或按某种确定的函数规律变化的误差, 例如放大器的失调电压或电流引起的误差, 开关接触电势

引起的误差,如标准量值的不准确、仪器刻度的不准确等引起的误差。系统误差将直接影响测量结果的准确度。

系统误差最显著的特点,就是在一定条件下,其数值服从于某一确定的函数规律。结合有关专业知识,通过理论分析或实验方法,人们可以掌握该规律。因而,系统误差的影响可以采用一定的技术措施或对测量值进行必要的修正来消除,或使之大为减弱。系统误差可以按对误差掌握的程度分为已定系统误差和未定系统误差。已定系统误差是指误差绝对值和符号已经确定的系统误差;未定系统误差是指误差绝对值和符号未能确定的系统误差,但通常可估计出误差范围。

系统误差也可以按误差出现规律分为不变系统误差和变化系统误差。不变系统误差是指误差绝对值和符号为固定的系统误差。变化系统误差是指误差绝对值和符号为变化的系统误差。按其变化规律,又可分为线性、周期性系统误差和复杂规律系统误差等。

### 2) 随机误差

在同一测量条件下,多次测量同一量值时,绝对值和符号以不可预定方式变化着的误差称为随机误差。例如仪器仪表中传动部件的间隙和摩擦、连接件的弹性变形等引起的示值不稳定。

### 3) 粗大误差

超出在规定条件下预期的误差称为粗大误差,或称“寄生误差”。此误差值较大,明显歪曲测量结果,如测量时对错了标志、读错或记错了数、使用有缺陷的仪器以及在测量时因操作不细心而引起的过失性误差等。

上面虽将误差分为三类,但各类误差之间在一定条件下可以相互转化。对某项具体误差,在此条件下为系统误差,而在另一条件下可为随机误差,反之亦然。如按一定基本尺寸制造的量块,存在着制造误差,对某一块量块的制造误差是确定数值,可认为是系统误差,但对一批量块而言,制造误差是变化的,又成为随机误差。在使用某一量块时,没有检定出该量块的尺寸偏差,而按基本尺寸使用,则制造误差属随机误差。若测定出量块的尺寸偏差,按实际尺寸使用,则制造误差属系统误差。掌握误差转化的特点,可将系统误差转化为随机误差,用数据统计处理方法减小误差的影响,或将随机误差转化为系统误差,用修正方法减小其影响。

总之,系统误差和随机误差之间并不存在绝对的界限。随着对误差性质认识的深化和测试技术的发展,有可能把过去作为随机误差的某些误差分离出来作为系统误差处理,或把某些系统误差当作随机误差来处理。

## 1.1.2 精度

精度是反映测量结果与真实值接近程度的量,它与误差的大小相对应,因此可用误差大小来表示精度的高低,误差小则精度高,误差大则精度低。精度可分为:

①准确度 反映测量结果中系统误差的影响程度;

②精密性 反映测量结果中随机误差的影响程度;

③精确度 反映测量结果中系统误差和随机误差综合的影响程度,其定量特征可用测量的不确定度(或极限误差)来表示。

精度在数量上有时可用相对误差来表示,如相对误差为 0.01%,可笼统说其精度为  $10^{-4}$ ,若纯属随机误差引起,则说其精密性为  $10^{-4}$ ,若是由系统误差与随机误差共同引起,则说其精

确度为  $10^{-4}$ 。

对于具体的测量,精密度高的而准确度不一定高,准确度高的而精密度也不一定高,但精确度高,则精密度与准确度都高。

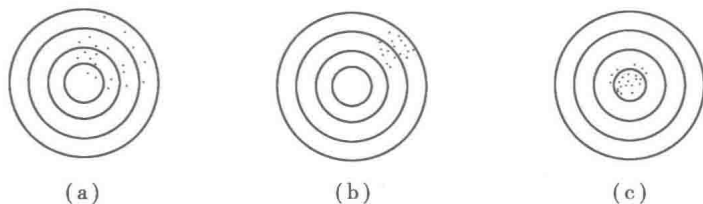


图 1.1 误差与精度的关系图

图 1.1 所示的打靶结果,子弹落在靶心周围有三种情况,图 1.1(a)的系统误差小而随机误差大,即准确度高而精密度低。图 1.1(b)的系统误差大而随机误差小,即准确度低而精密度高。图 1.1(c)的系统误差与随机误差都小,即精确度高,实际测量时希望得到精确度高的结果。

## 1.2 有效数字与数据运算

在测量结果和数据运算中,确定用几位数字来表示测量或数据运算的结果是一个十分重要的问题。测量结果既然包含有误差,说明它只是一个近似值,其精度有一定限度。在记录测量结果的数据位数或进行数据运算时的取值多少,皆应以测量所能达到的精度为依据。如果仅认为不论测量结果的精度如何,在一个数值中小数点后面的位数越多,这个数值就越精确;或在数据运算中,保留的位数越多,精度就越高,这种认识都是片面的。若将不必要的数字记录下来,既费时间,又无意义。一方面是因为小数点的位置决定不了精度,它仅与所采用的单位有关,如 35.6 mm 和 0.035 6 m 的精度完全相同,而小数点位置则不同。另一方面,测量结果的精度与所用测量方法及仪器有关,在记录或数据运算时,所取的数据位数,其精度不能超过测量所能达到的精度;反之,若低于测量精度,也是不正确的,因为它将损失精度。此外,在求解方程组时,若系数为近似值,其取值多少对方程组的解有很大影响。

例如,方程组(1.8a)和(1.8b)及其对应解为

$$\begin{cases} x-y=1 \\ x-1.000 \quad 1y=0 \end{cases} \quad \text{对应解为} \begin{cases} x=10 \ 001 \\ y=10 \ 000 \end{cases} \quad (1.8a)$$

$$\begin{cases} x-y=1 \\ x-0.999 \quad 9y=0 \end{cases} \quad \text{对应解为} \begin{cases} x=-9 \ 999 \\ y=-10 \ 000 \end{cases} \quad (1.8b)$$

两个方程组仅有一个系数相差 0.02%,但所得结果差异极大,由此也可看出研究有效数字和数据运算规则的重要性。

### 1.2.1 有效数字

含有误差的任何近似数,如果其绝对误差仅是最末位数的半个单位,那么从这个近似数左方起的第一个非 0 的数字,称为第一位有效数字。从第一位有效数字起到最末一位数字止的所有数字,不论是 0 或非 0 的数字,都叫有效数字。若具有  $n$  个有效数字,就说是  $n$  位有效位

数。例如取  $\pi=3.14$ , 第一位有效数字为 3, 共有三位有效位数; 又如 0.002 7, 第一位有效数字为 2, 共有两位有效位数; 而 0.002 70, 则为三位有效位数。

若近似数的右边带有若干个 0 的数字, 通常把这个近似数写成“ $a \times 10^n$ ”形式, 而  $1 < a < 10$ 。利用这种写法, 可从含有几个有效数字来确定近似数的有效位数。如  $2.400 \times 10^3$  表示四位有效位数;  $2.40 \times 10^3$  和  $2.4 \times 10^3$ , 分别表示三位和两位有效位数。

在测量结果中, 其末一位有效数字取到哪一位, 是由测量精度来决定的, 即最末一位有效数字应与测量精度是同一量级的。实验数据的记录必须注意仪表的最小分度值, 应在最小分度值后保留一位可疑数字。如采用最小刻度为  $0.1\text{ }^\circ\text{C}$  的温度计进行温度测量时, 若测出的温度  $T=85.452\text{ }^\circ\text{C}$ , 显然小数点后第一位数字是可靠, 而第二位数字是不可靠, 那么第三位数就更不可靠了, 此时只应保留小数点后第二位数字, 即写成  $T=85.45\text{ }^\circ\text{C}$ , 也就是保留一位估读数字, 该测量的有效数字是 4 位; 又如用最小刻度为 mm 的以汞为指示液的液柱式压差计测量孔板两侧的压差时, 压差计的读数不应记做 354.43 mmHg, 而应记做 354.4 mmHg; 若在读数过程中, 由于设备本身原因使所测参数有波动时, 可读取最高值与最低值再取平均。由此可知, 测量结果应保留的位数原则是: 其最末一位数字是不可靠的(估读数字), 而倒数第二位数字应是可靠的。测量误差一般取 1~2 位有效数字, 因此上述用温度计的测量结果可表示为  $T=85.45 \pm 0.05\text{ }^\circ\text{C}$ 。

在比较重要的测量时, 测量结果和测量误差可比上述原则再多取一位数字作为参考, 如测量结果可表示为  $15.214 \pm 0.042$ 。因此, 凡遇有这种形式表示的测量结果, 其可靠数字为倒数第三位数字, 不可靠数字为倒数第二位数字, 而最后一位数字则为参考数字。

### 1.2.2 数字舍入规则

对于位数很多的近似数, 当有效位数确定后, 其后面多余的数字应予舍去, 有效数字最末一位数字应按以下的舍入规则进行凑整。

- ①若舍去部分的数值大于保留部分的末位的半个单位, 则末位加 1;
- ②若舍去部分的数值小于保留部分的末位的半个单位, 则末位不变;
- ③若舍去部分的数值等于保留部分的末位的半个单位, 则末位凑成偶数, 即偶数时则末位不变, 末位为奇数时则末位加 1。

按数字舍入规则, 将下面各个数据保留四位有效数字进行凑整。

原有数据	舍入后数据	原有数据	舍入后数据
3.141 59	3.142	6.378 501	6.379
2.717 29	2.717	7.691 499	7.691
4.510 50	4.510	5.434 60	5.435
3.215 50	3.216		

由于数字舍入而引起的误差称为舍入误差, 按上述规则进行数字舍入, 其舍入误差都不超过保留数字最末位的半个单位。需要指出的是: 这种舍入规则的第 3) 条明确规定, 被舍去的数字不是见 5 就入, 从而使舍入误差成为随机误差, 在大量运算时, 其舍入误差的均值趋于 0。这就避免了过去所采用的四舍五入规则时, 由于舍入误差的累积而产生系统误差。

### 1.2.3 数据运算规则

在近似数运算中,为了保证最后结果有尽可能高的精度,所有参与运算的数据,在有效数字后可多保留一位数字作为参考数字,或称为安全数字。

①近似数加减运算时,各运算数据以小数位数最少的数据位数为准,其余各数据可多取一位小数,但最后结果应与小数位数最少的数据小数位相同。

如: $12.8+36.573+45.206+0.089=?$  应以 12.8 为基准,将其改写为

$$12.8+36.57+45.21+0.09\approx 94.7$$

②在近似数乘除运算时,各运算数据以有效位数最少的数据位数为基准,其余各数据要比有效位数最少的数据位数多取一位数字,而最后结果应比基准的多取一位有效数字。

如: $28.34\times 1.2\times 2\ 378\times 0.002\ 654=?$

先将其中能用科学记数法记录的数字改写为科学记数法表示,即改写为

$$28.3\times 1.2\times 2.38\times 10^3\times 2.65\times 10^{-3}\approx 214$$

③在近似数进行乘幂运算时,平方相当于乘法运算,开方是平方的逆运算,故可按乘除运算处理。

如: $28.5^{0.5}\approx 5.339$

④在对数运算时, $n$  位有效数字的对数应该用  $n$  位对数表示,即真数和对数具有的有效位数相等,或用  $(n+1)$  位对数表示,以免损失精度。

如: $\lg 2384\approx 3.377\ 3$

⑤在三角函数运算中,所取函数值的位数应随角度误差的减小而增多,表 1.1 给出了其对应关系。

表 1.1 角度误差与三角函数值位数

角度误差	10"	1"	0.1"	0.01"
函数值位数	5	6	7	8

上述的运算规则,都是一些常见的最简单情况,但实际问题的数据运算更复杂,往往一个问题要包括几种不同的简单运算,对中间的运算结果所保留的数据位数可比简单运算结果多取一位数字。

## 1.3 实验数据处理

### 1.3.1 实验结果的表示方法

实验结果的表示方法有列表法、图示法和回归法,并注明实验设备和实验条件。在工程实验中,根据设计的实验装置和选用的测试仪表,通过测量相关参数,可以计算得到相应的实验结果,并可以采用不同的方式来表示实验结果。如采用如图 1.2 所示的装置测定孔板流量计的流量曲线,该实验以水为实验介质,汞为压差计的指示剂,测量孔板流量计在不同流量时压

差计的读数,可以分别采用列表法、图示法和回归法来表示孔板流量计测量的实验结果。

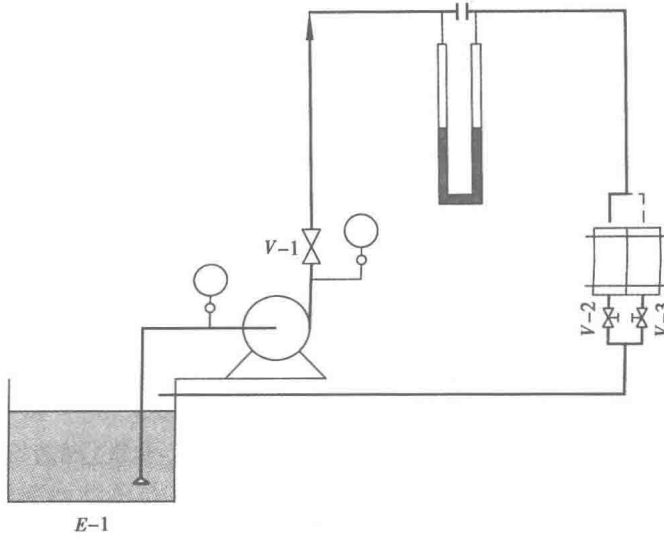


图 1.2 孔板流量计实验装置图

(1) 列表法

表 1.2 给出了采用列表法表示孔板流量计实验测定的流量与压差计读数的关系。一般实验数据量较少的实验结果较适合采用列表法来表示,但列表法描述的实验结果不能形象、直观地表示变量之间的变化趋势。

表 1.2 孔板流量计的流量与压差计读数关系

压差计读数/mmHg	421.9	357.0	223.0	122.9	43.9	22.9
流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.004 48	0.004 00	0.003 23	0.002 36	0.001 46	0.001 09

(2) 图示法

图 1.3 是孔板流量计实验测定的流量与压差计读数的实验数据采用图示法来表示的结果。图中曲线十分直观地表述了流量随压差计读数的变化趋势。

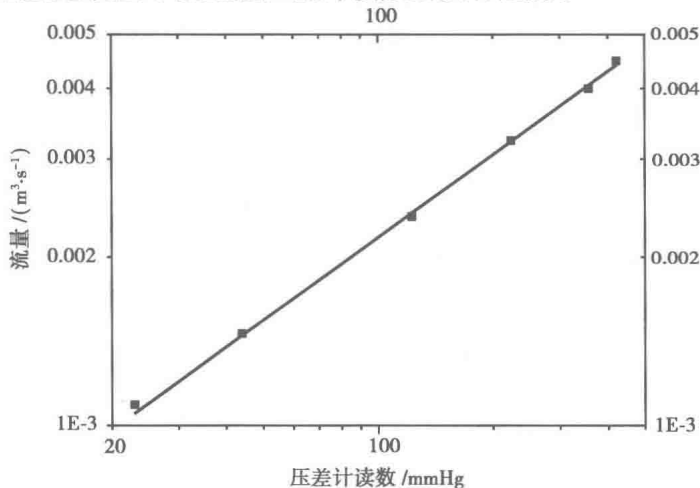


图 1.3 孔板流量计的流量曲线



采用图示法描述实验结果时,其关键在于选用合适的坐标系,常用的坐标系有直角坐标、半对数坐标和双对数坐标。坐标系的选用应遵循下列原则。

### 1) 直角坐标系

当变量关系为  $y=ax+b$  ( $a, b$  为常数) 时应选用直角坐标。图 1.4 是将表 1.2 中的实验数据在直角坐标系中作图的结果。

### 2) 双对数坐标

当变量关系为  $y=mx^n$  ( $m, n$  为常数) 时应选用双对数坐标。将变量关系式两边取对数,原变量关系可改写为  $\lg y = \lg m + n \lg x$ 。因此,  $\lg y$  与  $\lg x$  满足直线关系,对数坐标在坐标上对数化,免除了在直角坐标系中先将  $x, y$  取对数计算后再绘图的不便。对数坐标是以  $\lg 1$  为原点,  $\lg 10$  为 1,  $\lg 100$  为 2,  $\lg 1000$  为 3,  $\dots$ , 一个数量级之间的距离相等,而坐标上以真数 1, 10, 100, 1000,  $\dots$  进行标度,因此对数坐标以真数  $x, y$  直接绘图。但必须注意的是对数坐标不能自取分度值,而只能平移数量级。图 1.3 是将表 1.2 中的实验数据在对数坐标系中作图的结果。

### 3) 半对数坐标

当变量关系为  $y=m10^{nx}$  ( $m, n$  为常数) 时应选用半对数坐标。将原变量关系式两边取对数,原变量关系改写为  $\lg y = \lg m + nx$ ,说明  $\lg y \sim x$  满足线性关系,因此采用一个对数化的坐标轴而另一个仍为直角坐标轴的半对数坐标系,作图时变量  $y$  选择对数坐标,变量  $x$  选用直角坐标。图 1.5 是将表 1.2 中的实验数据在半对数坐标系中作图的结果。

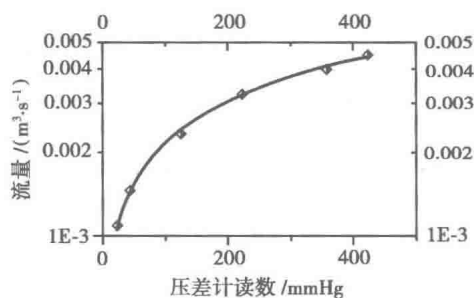
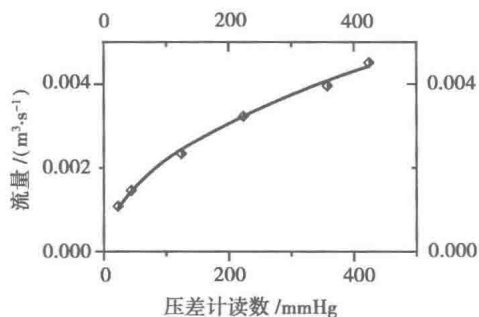


图 1.4 直角坐标系中的孔板流量计的流量曲线

图 1.5 半对数坐标系中的孔板流量计的流量曲线

采用图示法描述实验数据时,选择好坐标系后确定分度值(对数坐标除外)和起点。坐标系的分度值及最小值应与测试参数的仪表最小分度值保持一致。对一些计算结果,其分度值取得恰当。分度值取得太细会放大误差,从而掩盖了实验结果的变化规律,图 1.6 是孔板流量计的流量系数曲线;而分度值取得太粗则会压缩曲线,也不能正确实验结果的变化规律,图 1.7 是孔板流量计的流量系数曲线。坐标的起点不一定取  $(0, 0)$ ,而且直角坐标的横轴与纵轴的分度可以不同,但应尽可能在  $45^\circ$  的图幅上布置曲线。

选好坐标系、起点、坐标分度后,用实验数据描点,当需要在同一张图中绘制多条曲线时,不同曲线的数据点应采用不同符号表示。曲线的连接不是将每个实验数据点依次连接为一条折线,而是通过观察实验数据点的分布状况后让实验数据点均匀地落在线上以及曲线的两侧,从而连接成一条光滑的曲线。同时在图中应标注出相应的实验条件。

用图示法描述实验结果,变量之间的变化趋势形象直观,而且方便计算机编程使用。但采用查图法获取的数据误差较大。