



高等学校化学化工实验新课程体系系列教材

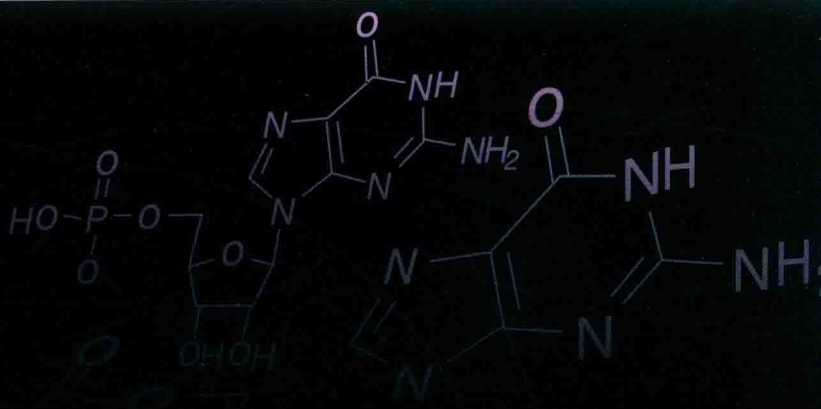
丛书主编 何红运

化工原理 实验

主编 徐 琼



湖南师范大学化学化工实验教学中心 组编



湖南师范大学出版社



高等学校化学化工实验新课程体系系列教材

丛书主编 何红运

化工原理 实验

主 编 徐 琼

副主编 赵海红

编 者 徐 琼 陈学伟 尹 疆
毛丽秋 赵海红 赵伟良
肖 毅 杨立山

湖南师范大学化学化工实验教学中心 组编

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理实验 / 徐琼主编. —长沙: 湖南师范大学出版社, 2016. 9
ISBN 978 - 7 - 5648 - 2601 - 7

I. ①化… II. ①徐… III. ①化工原理—实验 IV. ①TQ02 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 194812 号

化工原理实验

徐 琼 主编

- ◇策划编辑: 宋 瑛
- ◇责任编辑: 宋 瑛
- ◇责任校对: 胡晓军
- ◇出版发行: 湖南师范大学出版社
地址: 长沙岳麓山 邮编: 410081
电话: (0731) 88873070 88873071 传真: (0731) 88872636
网址: <http://press.hunnu.edu.cn>
- ◇经销: 湖南省新华书店
- ◇印刷: 湖南雅嘉彩色印刷有限公司
- ◇开本: 787 mm × 1092 mm 1/16
- ◇印张: 8.5
- ◇字数: 181 千字
- ◇版次: 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷
- ◇书号: ISBN 978 - 7 - 5648 - 2601 - 7
- ◇定价: 20.00 元

如有印装质量问题, 请与承印厂调换



高等学校化学化工实验新课程体系系列教材

编辑委员会

主 任 何红运

副主任 马 铭 曾 跃

委 员 胡瑞祥 谢祥林 徐广宇

徐 琼 陈 超 唐 敏

余丽萍 赵海红 孟 勇

前 言

化学化工实验教学是高校化学、化学工程与工艺、制药工程、应用化学、生物、农学、材料、资源循环、医学等多个专业教学体系的重要组成部分;是向学生传授知识,进行科学实验方法和技能训练,提高学生实践能力与分析解决问题的能力,培养学生科学精神与创新意识,形成科学的世界观和方法论的重要教学环节;是全面实施素质教育的有效形式。

为了适应新世纪人才培养的需要,我院于2008年组织教师编写出版了本科化学实验(一)、本科化学实验(二)和化学研究与设计性实验三本教材,全套教材内容由浅入深,由易到难,由简单到综合,涵盖了化学类专业各门实验课程基本内容,满足教育部化学与化工学科教学指导委员会提出的化学类专业实验教学基本内容要求,融合了我院和部分高等院校实验教学改革的成果,内容丰富,结构新颖、合理,特别是在化学研究与设计性实验教材中,一批凝聚着我院大多教师心血与经验的许多科研成果恰当地转化成研究设计性实验教学项目,使学生有更自由的空间在更高层次上主动学习,更好地启迪和培养了学生的创新意识和创新能力。该教材已在我校八届学生中使用,在培养高素质人才中发挥了重要作用。但随着科学技术的迅猛发展和生产水平的快速提高,化学与其他学科相互渗透、交叉融合,大大促进了其他学科的发展以及新兴交叉学科的形成,进一步确立了化学中心科学的地位,也促进了化学实验课程体系与教学内容的不断调整、优化与更新。为巩固近年实验教学改革的成果,更好地指导今后的实验教学,我们感到很有必要再重新编写一套化学化工类实验系列教材。

编写本系列教材的筹备工作从2013年下半年开始,我院领导对本套教材的编写工作给予了高度重视,成立了编委会,由化学化工实验教学中心国家示范实验室主任何红运教授担任编委会主任兼任总主编,并选定了各册教材的主编与副主编。

本系列教材分为基础化学实验、综合化学实验和专业实验三大模块,基础化学实验分为无机化学实验、分析化学实验(含仪器分析实验)、有机化学实验、物理化学实验、化工原理实验和普通化学实验共6册,综合化学实验分为综合化学实验(一)和综合化学实验(二)共2册,专业实验分为化学工程与工艺、资源循环科学与工程、应用化学、制药工程专业实验和中学化学实验教学研究共5册。

本系列教材的特点是:(1)基础化学实验各册仍然保持与各相关学科理论课的讲授相互配合、相互促进,但不相互依赖的特点,实验基础知识和基本操作技能叙述全

面,便于在基础知识还不够全面的低年级学生中组织教学;(2)综合化学实验包含两个以上二级学科内容,从化学不同分支学科的结合上培养学生综合解决问题的能力,从而使他们的科学思维能力和创新意识得到进一步的培养;(3)专业实验结合学生的专业特色选择实验项目,使学生实验后,既具备扎实的综合基础知识,又掌握了某个特殊专业领域的实验研究与实际操作技能,以满足社会对各类特殊人才的需要。

本册教材为《化工原理实验》,是化工、化学、应化、制药及相关专业学生必修的一门专业基础课程,是培养学生的工程观念和工程实践能力的重要实践性课程。本书作为化工原理实验教材,注重实验能力和素质的培养与训练,注重理论与实践的结合,每个实验项目应化工生产中的一个单元操作,通过实验建立起一定的工程概念。本书简单介绍了化工原理实验的特点、内容、教学方法和实验数据的处理及误差分析方法,重点介绍了14个化工原理实验的实验原理、实验装置和实验方法,并在每个实验项目后给出思考题供学生思考。为推进教育信息化发展,在本院化工原理实验中增开了化工单元虚拟仿真实验,并在本书中详细介绍了其中6个单元的开、停车操作及常见故障处理的虚拟仿真操作。参加本教材编写的人员有徐琼(第一章,第二章实验一、二、三、十、十一,第三章)、陈学伟(第二章实验四、十二)、尹疆(第二章实验五)、毛丽秋(第二章实验六)、赵海红(第二章实验七)、赵伟良(第二章实验八)、肖毅(第二章实验九)、杨立山(第二章实验十三、十四),由徐琼副教授任主编。

各册教材初稿完成后,由主编汇总修改,全套教材由何红运教授审阅定稿。

本套教材编写过程中,我们借鉴了兄弟院校教材中许多有益的内容,院学术委员会对该书进行了审阅并提出了许多宝贵的建设性意见,湖南师范大学出版社给予了大力支持,在此一并致谢。

限于编者学识水平和经验,书中难免有错误和疏漏之处,敬请有关专家和读者批评指正。

丛书编委会

2016年9月

目 录

第一章 绪论	(1)
一、化工原理实验的特点和目的	(1)
二、教学内容及要求	(2)
三、学生实验守则	(3)
四、实验数据处理	(4)
五、实验误差分析	(6)
第二章 化工原理实验	(8)
实验一 雷诺实验	(8)
实验二 柏努利实验	(11)
实验三 流体管路阻力的测定	(14)
实验四 流量计校正实验	(19)
实验五 离心泵特性曲线的测定	(23)
实验六 气-汽对流传热系数的测定	(28)
实验七 恒压过滤常数测定实验	(32)
实验八 精馏塔的操作及全塔效率的测定	(40)
实验九 板式塔流体力学性能测定	(46)
实验十 填料塔吸收实验	(52)
实验十一 水-丙酮-空气体系填料塔总传质系数的测定	(59)
实验十二 振动筛板塔萃取实验	(65)
实验十三 流化床干燥实验	(76)
实验十四 洞道式干燥实验	(82)

第三章 虚拟仿真实验	(89)
实验十五 液位控制系统单元仿真实验	(89)
实验十六 压缩机单元仿真实验	(95)
实验十七 管式加热炉单元仿真实验	(100)
实验十八 吸收解吸单元仿真实验	(107)
实验十九 固定床反应器单元仿真实验	(116)
实验二十 间歇反应釜单元仿真实验	(121)
参考文献	(127)

第一章 绪论

一、化工原理实验的特点和目的

1. 化工原理实验的特点

化工原理实验是化工、制药、环境、食品、生物工程等专业学生必修的一门课程,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。

化工原理实验不同于基础课程的实验,它属于工程实验范畴。基础课程实验面对的是基础科学,采用的方法是理论的、严密的,处理的对象通常是简单的、基本的甚至是理想的,而工程实验面对的是复杂的实际问题 and 工程问题。对象不同,实验研究方法也必然不同。工程实验的困难在于变量多,涉及的物料千变万化,设备大小悬殊,实验工作量之大之难是可想而知的。因此不能把处理一般物理实验的方法简单地套用于化工原理实验。数学模型方法和量纲分析法指导下的实验研究方法是研究工程问题的两个基本方法,因为这两种方法可以成功地使实验研究结果由小见大、由此及彼地应用于大设备的生产设计上。例如,在量纲分析法指导下的实验,可不需要过程的深入理解,不需要采用真实的物料、真实流体或实际的设备尺寸,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,经一些设备性的实验或理性的推断得出过程的因素,从而加以归纳和概括成经验方程。这种量纲分析法指导下的实验研究方法,是确立解决难于作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有充分认识的基础上,将过程作高度的概括,得到简单而不失真的物理模型,然后给予数学上的描述。这种研究方法同样可以具备以小见大、由此及彼的功能。

2. 化工原理实验的目的

湖南师范大学化工原理实验室于 2014 年启用新购置的实验设备,采用手动操作和计算机在线数据采集与控制系统,引入先进的测试手段和数据处理技术;实验室的开放,除完成实验教学基本内容外,可为对化工原理实验感兴趣的同学提供实验场所,培养学生的科研能力和创新精神。

(1) 巩固和深入理解理论知识。在学习化工原理课程的基础上,进一步理解典型的已被广泛应用的化工单元操作的原理和流程、熟悉设备的结构和操作,巩固和深入理解化工原理的理论知识。

(2) 培养工程意识和工程观念。在化工原理实验课程中,可有意识地运用所学的

化工原理等化学、化工的理论知识去解决实验过程中遇到的各种实际问题,并进一步联系工程问题,引导学生用工程价值观念来考虑和解决实际工程问题;同时在实验中学习大型设备的操作和运用工程研究方法获得新的知识和信息,亦有利于学生工程观念的培养。

(3)培养学生从事科学实验的能力。化工由很多单元过程和设备所组成,学生运用理论去指导并且能够独立进行化工单元的操作,在现有设备中完成指定的任务,并预测某些参数的变化对过程的影响。实验过程中培养的能力主要包括:①实验前设计实验方案的能力;②进行实验时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利用实验的原始数据进行数据处理以获得实验结果的能力;⑤运用文字表达撰写实验报告的能力;等等。学生通过一定数量的实验训练,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好坚实的基础。

(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。

二、教学内容及要求

通过化工原理实验课程的教学应让学生掌握科学实验的全过程,此过程应包括:(1)实验前的准备;(2)进行实验操作;(3)正确记录和处理实验数据;(4)撰写实验报告。

以上四个方面是实验课的主要环节,认为实验课就是单纯进行实验“操作”的观点应该改变。

为使本实验课程达到教学目的,在以上四个教学环节中对指导老师和学生的要求如下:

1. 实验前的准备

老师做好预备实验,确保实验设备正常运行,准备好实验所需试剂、药品。

学生认真阅读实验指导书和有关参考资料,了解实验目的和要求、实验基本原理,了解所用实验装置,熟悉实验流程、测试点等;预先组织好2~4人的实验小组,预先作好分工,并写出实验的预习报告。预习报告应在实验前交给实验指导教师审阅,获准后学生方能参加实验。

预习报告的内容应包括:

- (1)实验目的和内容;
- (2)实验的基本原理;
- (3)实验装置及流程图;
- (4)实验操作步骤和实验数据的布点;
- (5)原始数据的记录表格。

2. 进行实验操作和正确记录实验数据

老师结合理论知识及工程实践讲解实验目的、流程、操作要求及注意事项等,观察

并指导学生进行实验操作、数据记录,引导学生解决实验过程中遇到的问题。

学生进行实验操作,在操作中应能进行理论联系实际的思考,并认真观察实验现象,准确记录实验原始数据。

3. 撰写实验报告

实验结束后按要求正确处理实验数据,撰写实验报告。本课程实验数据的处理结果要求列表整理,并附一组计算示例。本课程实验报告的内容应包括以下几项:

(1)实验名称,实验人姓名、年级和班级、专业,指导教师,实验日期。

(2)实验目的: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,重要定律、公式等。

(4)实验装置流程图:画出实验装置流程图,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)实验操作步骤: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:准确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,根据仪表的精度决定实验数据的有效数字位数。

(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。并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。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)实验结果的分析与讨论:实验结果的分析与讨论是作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:

①从理论上对实验所得结果进行分析和解释,说明其必然性;

②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;

③分析误差的大小和产生的原因,指出提高实验结果精度的途径;

④将实验结果与前人和他人的对比,说明结果的异同,并解释这种异同;

⑤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;

⑥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。

(10)实验结论:结论是根据实验结果所作出的最后判断,得出的结论要从实际出发,有理论依据。

三、学生实验守则

为了保持良好的实验环境和工作秩序,防止意外事故发生,同时培养同学们优良

的实验习惯,保证实验教学效果,在进入化工原理实验室进行实验的各专业学生均应遵守如下条例:

(1) 遵守纪律不迟到不早退,在实验室内保持安静,不大声谈笑,不做与实验无关的事情,遵守实验室的一切规章制度,实验期间不得随意离开实验室。

(2) 保持实验室整洁,废品、废物丢入垃圾箱内;爱护仪器,注意安全,水、电、煤气、药品要节约使用,如有损坏仪器设备,及时向实验指导老师报告,并按有关规定办理相应手续。

(3) 每次实验后对使用过的仪器设备填写使用记录,及时做好清洁工作。

(4) 实验前按要求认真预习,写好预习报告(填入实验报告相应部分),经老师提问通过后,方可准予参加实验,没有预习不能进行实验。

(5) 实验时要严格遵守仪器、设备、电路的操作规程,不得擅自变更,操作前须经教师检查同意后方可接通电路和开车,操作中仔细观察,如实记录实验现象和数据,不得涂改和伪造实验数据。仪器设备发生故障严禁擅自处理,应立即报告老师。

(6) 实验数据记录须交指导老师审阅、签字,经老师同意后方可离开实验室。

(7) 实验后根据原始数据记录、处理数据、分析问题及时作好实验报告。实验报告中所有内容一律手写,具体格式和要求参见实验教材相关部分。

四、实验数据处理

1. 有效数字的概念

在测量和实验的数据处理中,应该用几位数字来表示测量的结果,这是一个很重要的问题。认为小数点后面的数字越多越准确或者是运算结果保留的位数越多越准确的想法是错误的。测量值所取的位数,应正确反映所用的仪器和测量的方法可能达到的精度。

记录测量数值时,一般只应也只能保留一位估计数字。例如,压差计的读数为 136.7 mmHg,前三位数字 136 是准确知道的,0.7 是估计读出的。为了能清楚地表示出数据的准确度和方便运算,可将读取的数据写成指数的形式。在第一位有效数字后加小数点,而其数值数量级则由 10 的幂次方来确定。比如前面读的 136.7 mmHg,可记为 (1.367×10^2) mmHg,它表示其有效安全数字为四位。这时,即使有效安全数字末位为零,也要记取。例如,微压计读数恰好为 125.0 mmH₂O,可记为 (1.250×10^2) mmH₂O。

如果是非直接测量值,即必须通过中间运算才得到结果的数据,可按有效数字的运算规则进行运算。

(1) 加法运算:在各数中,以小数位数最少的数为准,其余各数均凑成比该数多一位。

例如: $20.4 + 16.12 + 0.522 + 0.04257$

$$\rightarrow 20.4 + 16.12 + 0.52 + 0.04 = 37.08$$

(2)减法运算:当相减的数差得较远时,有效数字的处理与加法相同。但如果相减的数非常接近,这样相减则失去若干有效数字。因此,除了保留应该保留的有效数字外,应对计算方法或测量方法加以改进,使之不出现两个相接近的数相减的情况。

(3)除法运算:在各数中,以有效数字位数最少的数为准,其余各数及积(或商)均凑成比该数多一位。

例如: $374.21 \times 0.32 \div 2.011$

$$\rightarrow 374 \times 0.32 \div 2.01 = 59.5$$

(4)计算平均值:若为四个或超过四个数相平均,则平均值的有效数字位数可增加一位。

(5)乘方及开方运算:运算结果比原数据多保留一位有效数字。

例如: $25^2 = 625$, $\sqrt{4.8} = 2.19$

(6)对数运算:取对数前后的有效数字位数应相等。

例如: $\lg 2.345 = 0.3701$, $\lg 2.3456 = 0.37025$

2. 实验数据的处理

化工原理实验测量多数是间接测量,如通过测量流量可计算获得流速。实验数据处理就是将实验中获得的一系列原始数据经过分析、计算整理成各变量之间的定量关系,并用适宜的方式表达出来。实验数据相互之间的关系表达一般有三种方法:列表法、作图法和方程式关联法。一般处理的程序是:首先将直接测量结果按顺序列表格,然后计算中间结果、间接测量结果及其误差;将这些结果列成表格;最后按实验要求将结果用图形或者经验公式表示出来。

(1) 实验数据的列表

实验数据列表可分为原始数据记录表和实验数据整理计算表两类。前者是根据实验内容在实验之前设计好的,后者是根据实验要求计算得到所需的中间结果和最终要求的物理量。

列表表示实验数据和结果整齐规则,一目了然,便于检查和比较。一个完整的表格应包括表格的序号、名称、项目、说明和数据来源等。在制作表格时,表的每一行或每一列应该正确写出表头,或称为栏头,在表中只填入纯数值,表头的形式应该为:量/单位。公共乘方因子也应放到表头中。

(2) 实验曲线的绘制

实验数据图形表示法的优点是简明直观,便于比较,容易看出数据中的极值点、转折点、周期性、变化率以及其他特性。实验曲线也有助于找出它的数学模型。

在化工原理实验中,用作图法表达数据间的函数关系通常要考虑如下问题:

①坐标系的选择:常用的坐标有直角坐标、对数坐标和半对数坐标等,根据数的关系或预测的函数形式进行选择。如是线性函数,采用直角坐标;幂函数则采用对数坐标以使图形线性化;指数函数则采用半对数坐标;若自变量或者因变量中的一个最小值与最大值之间数量级相差太大时,亦可以选用半对数坐标。

例如对于函数 $y = ae^{bx}$, 可用 y 为对数分度、 x 为直线分度的半对数坐标, 因为

$$\ln y = \ln a + bx$$

而对于抛物线 $y = ax^b$ 应采用双对数坐标, 因为:

$$\lg y = \lg a + b \lg x$$

上式是一条直线式。

应该清楚地看到, 在对数坐标上, 标出的数值为真数, 原点应该是 1 而不是 0, 又由于 1、10、100 等的常用对数分别为 0、1、2 等, 所以在坐标纸上, 每一数量级的距离是相等的。由于是真数标值, 所以求取直线的斜率时, 不能直接用标度数值计算, 而应该用它的对数。设斜率为 K , 则:

$$K = \frac{\lg y_2 - \lg y_1}{\lg x_2 - \lg x_1}$$

②坐标的分度: 坐标的分度是指每个坐标所代表的数值的大小, 即坐标的比例尺。对于同一套数据, 以不同的比例尺绘制, 会得到不同形状的曲线。如果比例选择不当, 不仅会使图形失真, 而且可能会得出错误的结论。

坐标的分度应与实验数据的有效数字大体相符, 最适合的分度是使实验曲线坐标读数和实验数据具有同样的有效数字位数。其次, 横、纵坐标之间的比例不一定取得一致, 应根据具体情况选择, 使实验曲线的坡度介于 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间, 这样的曲线坐标读数准确度较高。

(3) 经验公式的确定

把实验数据用一定的函数关系式表示的方法称为方程式关联法, 它直观地描述了过程或现象的自变量和因变量之间的关系, 还可进一步进行数据处理, 如积分、微分、求极值等。化工过程中的方程式的获得通常通过一定的实验数据构建经验方程式。采用将实验数据绘成实验曲线, 并与典型曲线相对比, 看实验曲线与哪种函数曲线相似就取哪种函数为经验公式。

(4) 经验公式中待定系数的确定

在经验公式中待定系数的确定常采用直线图解法求得, 即求直线斜率或截距后根据相互关系计算出来。凡可以在普通坐标系上把数据标绘成直线或经过适当变换后在对数坐标系上可化为直线的方程, 均可以采用直线图解法求常数。

除直线图解法外, 还有分组平均法、最小二乘法等。直线图解法最简单, 但精度较差; 最小二乘法计算复杂, 但精度较高。所以, 如果使用电子计算机计算, 采用最小二乘法可以达到又快又好的效果。

五、实验误差分析

实验过程中由于测量仪器、测量方法及人的观察力、周围环境等种种原因, 实验测量的所得数值和真值之间, 总存在一定的差异, 这种差异在数值上表现为误差。对测量误差进行估计和分析, 对评判实验结果和设计方案具有重要的意义。

1. 真值与平均值

任何一个被测量对象的物理量总具有一定的客观真实值——真值,但真值一般不能直接测出。实验科学给真值下了这样一个定义:无限多次的观察值的平均值,称为真值。由于实验观测的次数是有限的,因此有限次数观测值的平均值只能接近于真值,称为最佳值。实际工作中,一般取高一级的仪器的示值作为真值。

2. 绝对误差与相对误差

(1)绝对误差:用测量值 x 减去真值 A ,所得余量 Δx 为绝对误差。记为

$$\Delta x = x - A$$

(2)相对误差:衡量某一测量值的准确度的高低,应该用相对误差 δ 来表示。记为

$$\delta = (\Delta x / x) \times 100\%$$

3. 误差的性质

(1)系统误差:系统误差是指在测量或实验过程中未发觉或未确认的因子所引起的误差。这些因子影响的结果永远朝一个方向偏移,其大小及符号在同一组实验测量中完全相同,在条件改变时,按某一确定规律变化。例如水银温度计的零位变动偏高了 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,用这支温度计进行多次测量,每次都会偏高 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2)随机误差(或称偶然误差):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,也不可预测,但具有抵偿性的误差。如果对某一量作多次的精度测量,还会发现随机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,多次测量的算术平均值将更接近于真值。

(3)过失误差(或称粗差):粗差往往是由于操作错误引起的,常表现为误差特别大。由于这是人为产生,只要精心操作便可避免,故这类误差在数据处理时应予以剔除。

第二章 化工原理实验

实验一 雷诺实验

一、实验目的

1. 观察流体在管内流动的两不同流型。
2. 测定临界雷诺数 Re_c 。

二、实验原理

流体流动有两种不同型态,即层流(或称滞流,Laminar flow)和湍流(或称紊流,Turbulent flow),这一现象最早是由雷诺(Reynolds)于1883年首先发现的。流体作层流流动时,其流体质点作平行于管轴的直线运动,且在径向无脉动;流体作湍流流动时,其流体质点除沿管轴方向作向前运动外,还在径向作脉动,从而在宏观上显示出紊乱地向各个方向作不规则的运动。

流体流动型态可用雷诺准数(Re)来判断,这是一个由各影响变量组合而成的无因次数群,故其值不会因采用不同的单位制而不同。但应当注意,数群中各物理量必须采用同一单位制。若流体在圆管内流动,则雷诺准数可用下式表示:

$$Re = \frac{d u \rho}{\mu} \quad (1-1)$$

式中: Re —雷诺准数,无因次;

d —管子内径,m;

u —流体在管内的平均流速,m/s;

ρ —流体密度,kg/m³;

μ —流体黏度,Pa·s。

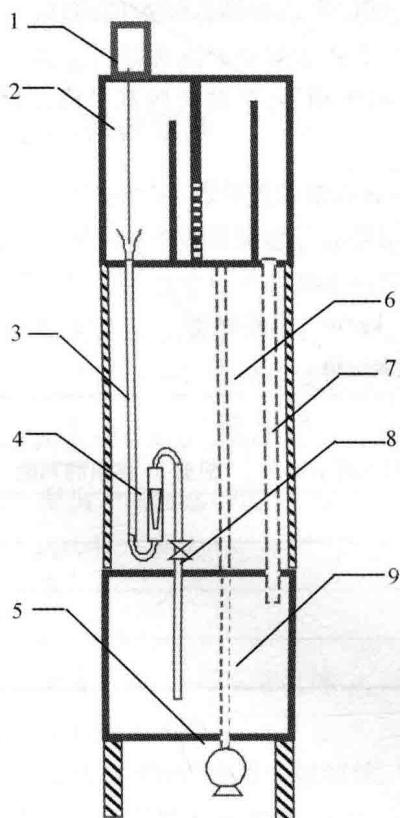
层流转变为湍流时的雷诺数称为临界雷诺数,用 Re_c 表示。工程上一般认为,流体在直圆管内流动时,当 $Re \leq 2000$ 时为层流;当 $Re > 4000$ 时,圆管内已形成湍流;当 Re 在 2000~4000 范围内,流动处于一种过渡状态,可能是层流,也可能是湍流,或者是

二者交替出现,这要视外界干扰而定,一般称这一 Re 数范围为过渡区。

式(1-1)表明,对于一定温度的流体,在特定的圆管内流动,雷诺准数仅与流体流速有关。通过改变流体在管内的速度,就可以观察到在不同雷诺准数下流体的流动形态。

三、实验装置及流程

实验装置如图 1-1 所示。主要由玻璃试验导管、流量计、流量调节阀、低位贮水槽、循环水泵、稳压溢流水槽等部分组成,主管路为 $\phi 20\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 硬质玻璃管。



(一) 示意图



(二) 现场图

图 1-1 雷诺实验流程示意图及现场图

- 1 - 红墨水储槽; 2 - 溢流稳压槽; 3 - 实验管; 4 - 转子流量计;
5 - 循环泵; 6 - 上水管; 7 - 溢流回水管; 8 - 调节阀; 9 - 储水槽。

实验前,先将水充满低位贮水槽,关闭流量计后的调节阀,然后启动循环水泵。待水充满稳压溢流水槽后,开启流量计后的调节阀。水由稳压溢流水槽流经缓冲槽、试验导管和流量计,最后流回低位贮水槽。水流量的大小,可由流量计和调节阀调节。

示踪剂采用红色墨水,它由红墨水贮瓶经连接管和细孔喷嘴,注入试验导管。细