



化工原理实验

王建成 卢燕 陈振 主编



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

化工原理 实验

王建成 卢 燕 陈 振 主编



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验/王建成,卢燕,陈振主编. —上海:
华东理工大学出版社,2007.9

ISBN 978-7-5628-2199-1

I. 化... II. ①王... ②卢... ③陈... III. 化工
原理-实验-高等学校-教材 IV. TQ02-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 138173 号

化工原理实验

.....

主 编 / 王建成 卢 燕 陈 振

责任编辑 / 陈新征

责任校对 / 李 晔

封面设计 / 王晓迪

出版发行 / 华东理工大学出版社

地 址:上海市梅陇路 130 号,200237

电 话:(021)64250306(营销部)

传 真:(021)64252707

网 址:www.hdlgpress.com.cn

印 刷 / 上海长阳印刷厂

开 本 / 787 mm×960 mm 1/16

印 张 / 11

字 数 / 172 千字

版 次 / 2007 年 9 月第 1 版

印 次 / 2007 年 9 月第 1 次

印 数 / 1—4050 册

书 号 / ISBN 978-7-5628-2199-1/TQ·124

定 价 / 17.50 元

(本书如有印装质量问题,请到出版社营销部调换。)

前言

化工原理实验属工程实验范畴,工程实验面对的是复杂的工程实际问题,其研究方法基础科学的实验相差甚远,因此不能把一般基础实验的研究方法简单地套用于化工原理实验。化工原理实验教学力求通过实验让学生掌握工程实验方法和技术,提高综合运用理论知识解决工程实际问题的能力,开拓思路,增强创新意识。

本书的编写以显著提高学生解决工程实际问题的能力为出发点,注重实验研究过程中多种能力和素质的培养和训练。全书内容涵盖化工实验研究涉及的三个主要方面:定量评价实验研究的方法,包括实验误差的估算与分析 and 实验数据的处理;实验参数测量常用技术与仪表;具体的实验项目。其中实验项目分为三个层次。

(1) 演示实验与标定实验 目的是让学生通过实验对有关的基本概念形成直观的印象,并学会对常用的测量仪表进行标定。

(2) 基础实验 通过基础实验让学生掌握基本的操作方法和参数测量技术,正确处理实验数据,并对实验结果进行合理的分析,深化对基本原理、基本概念的理解。

(3) 综合实验与选修实验 该层次的实验应达到两个目的:一是使学生开拓眼界,了解并熟悉新型单元操作设备的工艺特性与操作方法;二是使学生具有一定的设计实验的能力,能够正确选择实验设备,合理安排实验流程,利用实验研究解决工程实际问题。

本书由王建成、卢燕、陈振主编,张德祥、李光玲、刘玉婷、李国丽、孟霞等

老师也参与了编写。由于时间比较仓促,加之作者水平有限,难免出现不妥之处,敬请读者给予指正,帮助本书日臻完善。在编写过程中参考了兄弟院校的有关资料,在此表示衷心的感谢。

编 者

2007 年 6 月

目 录

绪 论	1
第 1 章 实验数据的误差分析	
1.1 有关实验数据的概念	10
1.2 有关误差的基本概念	13
1.3 误差的表示方法	15
1.4 误差的估算	18
第 2 章 实验数据处理	
2.1 列表法	25
2.2 图示法	27
2.3 数学模型表示法	30
第 3 章 化工测量仪表	
3.1 表征仪表特性的参数	40
3.2 压力与压差测量	43
3.3 温度测量	47
3.4 流量测量	52
3.5 液位测量	59
3.6 功率测量	61

■ 化工原理实验	
----------------	--

第4章 演示实验与标定实验

4.1 雷诺演示实验	64
4.2 流体机械能守恒演示实验	67
4.3 流线演示实验	69
4.4 板式塔流体力学演示实验	71
4.5 节流式流量计标定实验	72
4.6 热电偶标定实验	74
4.7 热电阻标定实验	76
4.8 测压仪表标定实验	78

第5章 基础实验

5.1 流体流动阻力测定实验	81
5.2 离心泵特性曲线测定实验	87
5.3 过滤常数的测定实验	92
5.4 对流传热系数与总传热系数测定实验	99
5.5 吸收塔的操作和吸收传质系数测定实验	105
5.6 精馏塔的操作和全塔效率测定实验	111
5.7 干燥曲线与干燥速率曲线测定实验	119

第6章 综合实验与选修实验

6.1 传热综合实验	126
6.2 正交试验法过滤实验	131
6.3 精馏综合实验	137
6.4 板式塔水力学综合实验	144
6.5 反渗透膜分离实验	148
6.6 超滤膜分离实验	152
6.7 蒸发综合实验	157

参考文献	166
------------	-----

绪 论

化工原理实验是化工、轻化工、环境等有关专业的一门必修的实验课程,属工程实验范畴,与一般化学实验相比,其工程特点非常突出,大多数实验项目与生产过程的单元操作具有一一对应的关系。通过实验能使學生建立一定的工程观念,了解与掌握工程实验原理及其测试手段,理解数学模型、工艺过程及真实设备之间的关系,了解有关参数的调节对工艺过程的影响。使學生在思维方式和创新能力方面得到培养与提高,动手能力和综合能力得到全面提高,为今后的工作打下坚实的基础。

一、化工原理实验的特点

化工原理实验强调理论与实践相结合,强化工程观念。将能力和素质培养贯穿于实验课的全过程,围绕“化工原理”课程的基本理论,开设演示实验、基础实验、综合型和研究型实验。许多工程类实验设备采用了计算机在线数据采集与控制系统,引入了先进的测试手段和数据处理技术,力求尽量与实际生产过程相同。大大缩短了理论与实践之间的距离。

化工原理实验的教学着眼于培养学生掌握工程类问题的实验研究方法,提升综合分析和解决工程类问题的能力。

二、化工原理实验的教学目的

化工原理实验教学目的主要有以下几点。

1. 巩固和深化理论知识

在学习化工原理课程的基础上,通过实验进一步理解一些比较典型的已被或将被广泛应用的化工设备的工作原理和操作流程,巩固和深化化工原理的理论知识。

2. 提供理论联系实际的机会

应用化工原理的理论知识去解决实验中遇到的各种实际问题,并通过实验深化对理论的理解,学会如何通过实验获得新的知识和信息。

3. 培养学生从事科学研究实验的能力

实验能力主要包括五个方面:为了完成一定的研究课题,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和解决实验问题的能力;正确选择和使用测量仪表的能力;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;书写实验报告的能力等。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,全面提高自身素质。

三、化工原理实验的教学内容

化工原理实验教学的内容主要包括实验理论教学和实践教学两大部分。

1. 实验理论教学

实验理论教学主要讲述化工原理实验的特点,化工原理实验的研究方法,实验数据的采集方法,实验数据的误差分析,实验数据的处理方法,与化工原理实验有关的计算机数据采集与控制的基本知识等。

2. 实践教学

实践教学分三个层次:演示实验、基础实验、综合性与研究型实验。

分层次教学能够在有限的学时内达到教学内容覆盖面广、夯实基础理论、提高综合能力的目的。

四、实验教学的环节与要求

化工原理实验包括:实验预习,实验操作,数据的测定、记录和处理以及编写实验报告四个主要环节,各个环节的具体要求如下。

1. 预习

(1) 认真阅读实验教材,复习课程教材以及参考书的有关内容,尝试对实验提出问题,带着问题到实验室现场预习。

(2) 熟悉设备装置的结构和流程。

(3) 明确操作程序与所要测定参数的项目,了解相关仪表的类型和使用方法以及参数的调整、实验测试点的分配等。

(4) 写出预习报告,预习报告中应简明扼要地说明实验目的、原理、操作步骤,并画出流程简图。

2. 实验操作

一般以 3~4 人为一小组合作进行实验,实验前必须作好组织工作,做到既分工、又合作,每位成员要各负其责,并且要在适当的时候进行轮换工作,这样既能保证实验质量,又能令每个人获得全面的训练。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,设备启动前必须进行检查,确定设备处于良好状态。

(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,处理问题时要注重了解全过程,这样做有利于提高分析问题和解决问题的能力。

(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) 停车前应先后将有关气源、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. 数据的测定、记录和处理

1) 测定数据的确定

凡是与实验结果有关或是整理数据时必需的参数都应一一测定。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。并非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、密度等数据,一般只要测出水温,即可由相关数据表查出,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

一般来说,实验时要测的数据尽管有许多个,但常常选择其中一个数据作为自变量来控制,而把其它受其影响或控制的数据作为因变量,如离心泵特性曲线就选择流量作为自变量,而把其它与流量有关的扬程、轴功率、效率等作为因变量。分析实验结果时往往要把这些测得的数据标绘在各种坐标系上,为了使所测数据在所绘曲线上均匀分布,往往涉及实验数据均匀分割的问题。化工原理实验最常用的坐标有两种:直角坐标和双对数坐标,坐标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 $x_{\max}$, $x_{\min}$ 之间的关系如下所述。

(1) 直角坐标系

$$\begin{aligned}x_{\min} &= x_1 \\x_{\max} &= x_n \\ \Delta x &= \frac{x_{\max} - x_{\min}}{n - 1} \\ x_i &= x_1 + (i - 1)\Delta x\end{aligned}$$

(2) 双对数坐标

$$\begin{aligned}x_{\min} &= x_1 \\x_{\max} &= x_n \\ \lg \Delta x &= \frac{\lg x_{\max} - \lg x_{\min}}{n - 1} \\ \Delta x &= \left(\frac{x_{\max}}{x_{\min}} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad x_{i+1} = x_i \cdot \Delta x\end{aligned}$$

3) 读数与记录

(1) 待设备各部分运转正常、操作稳定后才能读取数据,一般同一数据经两次(或两次以上)测定,读数非常接近可判定为操作稳定。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。

(2) 每次读数都应与其它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,并要在记录上注明。

(3) 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。

(4) 读取数据必须充分利用仪表的精度,读至仪表最小分度的下一位数,这个数应为估计值。如水银温度计最小分度为 0.1°C ,若水银柱恰指 22.4°C 时,应记为 22.40°C 。

碰到有些参数在读数过程中波动较大,首先要设法减小其波动。在波动不能完全消除情况下,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。

(5) 不要修改数据,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。

(6) 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

(1) 整理原始记录时,不能随意修改。经判断确实为过失误差造成的不正确数据须注明后才可以剔除。

(2) 采用列表法整理数据清晰明了,便于比较,一份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。

(3) 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 λ 值,可按以下方法进行。

由范宁公式

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

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

式中, 常数 $B' = \frac{2d}{l\rho}$ 。

实验中流体压降 Δp , 用 U 形压差计测定 (读数 R), 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 $B = \frac{d}{l} \cdot \frac{2g(\rho_0 - \rho)}{\rho}$

由此可知有变量 R 和 u , 这样计算 λ 非常方便。

(4) 实验结果及结论可用列表法、图示法或回归分析法来说明, 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。

五、编写实验报告

化工原理实验的研究对象是复杂的工程实际问题, 实验报告是对实验工作的系统概括和总结, 要求科学、严谨、全面。实验报告一般应包括以下几项内容。

1. 实验报告封面

封面一般包括实验名称, 报告人姓名、班级及同组实验人姓名, 实验地点, 指导教师和实验日期。

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

画流程示意图 (简图 1, 并注明操作用阀门及要读取数据的测量仪

表等。

5. 原始数据记录

实验过程中记录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。

6. 数据处理及实验结果

数据处理是实验报告的重要内容之一,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,明显给出实验结果;图要能直观地表达变量间的相互关系。

数据处理中,要求以一组原始数据为例(每个实验小组不能累同),写出详细的计算过程,以说明实验结果记录表中的数据是如何得到的。

7. 实验结果分析与讨论

实验结果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,主要内容包括以下四个方面。

- (1) 从理论上对实验所得结果进行分析和解释。
- (2) 对实验中的异常现象进行分析讨论,探讨影响实验的主要因素。
- (3) 分析产生误差的原因,估算误差的大小,探讨提高实验质量的途径。
- (4) 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。

8. 实验结论

结论是根据实验结果所作出的最后判断,实验者应依据基本理论并结合实际情况作出恰当中肯的结论。

9. 参考文献

实验报告中应将参考的主要资料和文献以清单形式逐一列出。

文献为期刊论文时,著录格式为:作者. 题名. 刊名[J], 出版日期, 卷号(期号); 起止页码。

文献为图书科技报告,著录格式为:作者. 书名[M]. 版本. 出版地址: 出版者. 出版日期。

六、化工原理实验的研究方法

化工原理研究的是复杂的工程问题,其研究方法与基础理论课程相差很大,在长期的发展过程中,形成了一套行之有效的研究方法,主要包括直接实验法、量纲分析法和数学模型法,三种方法各有特点、相互补充。

1. 直接实验法

这是一种解决工程实际问题的最基本的方法,对特定的工程问题直接进行实验测定,所得到的结果也较为可靠,但它往往只适用于条件相同的情况,具有较大的局限性。例如过滤某种物料,已知滤浆的浓度,在某一恒压条件下直接进行过滤实验,测定过滤时间和所得滤液量,根据过滤时间和所得滤液量两者之间的关系,可以作出该物料在某一压力下的过滤曲线。如果滤浆浓度改变或过滤压力改变,所得过滤曲线也都将不同。

对于多变量过程,为研究过程的规律,往往需要采取固定其它变量逐次改变某一变量的方法进行研究,实验工作量和财力投入很大。例如,在直管中流动阻力引起的压力降 $\Delta p = f(u, d, l, \mu, \rho, \epsilon)$, 共有 6 个自变量影响因变量 Δp , 如果每个自变量改变 10 次,需作 10^6 次试验才能比较全面地了解各自变量对 Δp 的影响,因此直接试验法是不合适的,需要采用科学的方法大幅度缩减实验工作量。

2. 量纲分析法

量纲分析法是化工研究中常用的一种实验研究方法,基本依据是量纲一致性原则,即物理方程中各项的量纲一致,其实质是将涉及的变量适当的组合成若干个准数(个数明显少于变量个数),得到准数方程,然后按准数方程进行实验研究。量纲分析法可大幅度减少实验工作量。

对前述的直管流动阻力引起的压力降 $\Delta p = f(u, d, l, \mu, \rho, \epsilon)$, 经量纲分析后(详见化工原理教材)得到 $\Delta p = \lambda \left(\frac{l}{d} \right) \left(\frac{u^2 \rho}{2} \right)$, 该方程为准数方程, 自变量为两个,每个自变量变化 10 次,总试验次数为 10^2 ,与直接实验法相比实验次数锐减,人、财、物的消耗大幅度降低。

3. 数学模型法

数学模型法是在对研究的问题有充分认识的基础上,按以下主要步骤进行工作的。

(1) 将复杂问题进行合理简化,提出一个接近实际过程又易于用数学方程式描述的物理模型。

(2) 对所得到的物理模型进行数学描述,即建立数学模型,然后确定该方程的初始条件和边界条件,求解方程。

(3) 通过实验对数学模型的合理性进行检验并确定模型参数。

数学模型法能够更好地揭示过程的本质,日益得到研究者的青睐,其发展应用前景非常广阔。

第 1 章

实验数据的误差分析

由于实验方法和实验设备的不完善,测量仪表和人的观察的偏差以及环境因素的影响,所得实验数据与被测量的真值之间不可避免地存在差异,此种差异即为实验数据的误差。对误差进行估算和分析,可以认清误差的来源和影响,确定导致误差的主要因素。从而能够正确组织实验过程,合理选用仪器和测量方法,减少产生误差的来源,提高实验质量。

1.1 有关实验数据的概念

1.1.1 直接测量值与间接测量值

实验数据一般可通过两种途径获得:一是直接从测量仪表上读取,此种数据为直接测量值;二是以直接测量的数据为依据,利用一定的函数关系式通过计算求取测量结果,此种数据为间接测量值。例如,测量空气密度时,可直接测量空气的温度、压力,再用 $\rho = \frac{pM}{RT}$ 计算出空气的密度。其中 T 、 p 是直接测量值, ρ 是间接测量值。

1.1.2 真值与平均值

真值是指某物理量客观存在的确定值。严格地讲,由于测量仪器、测量方法、环境、人的观察力、测量的程序等,都不可能是完美无缺的,故真值是无法测得的,是一个理想值。科学实验中真值的定义是:设在测量中测量的次数为无限多,根据误差分布定律,正负误差出现的概率应相等,故将各观察值相加,加以平均,在无系统误差的情况下,可能获得极近于真值的数值。故