



大学实验教学系列
DAXUESHIYANJIAOXUEXILIE

化工原理实验

李金龙 吕 君 张 浩 主编

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

大学实验教学系列
DAXUESHIYANJIAOXUEXILIE

化工原理实验

李金龙 吕 君 张 浩 主编

福建师范大学
图书馆
藏书印



T0979562

0979562

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

内 容 简 介

本书由长期工作在教学第一线的教师在多年教学实践的基础上,结合实验仪器设备情况,参考国内外同类教材编写而成。全书共涉及化工原理实验基础知识、基础实验、演示性实验、仿真实验四大部分内容,反映了化工单元操作的基本过程及发展,强调了实践性和注重工程实际的观点。

本书可作为普通高等院校化工类及其相关专业的化工原理实验或相关技术基础课的教材或教学参考书,也可供从事化工、石油、纺织、食品、环境、制药等领域从事科研、生产的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验/李金龙,吕君,张浩主编. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社,2012.6
ISBN 978-7-5661-0374-1

I. ①化… II. ①李… ②吕… ③张… 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(2012)第 125966 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心
开 本 787mm×1 092mm 1/16
印 张 13.25
字 数 316 千字
版 次 2012 年 7 月第 1 版
印 次 2012 年 7 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

化工原理实验是化工类及其相关专业的一门重要工程实践课程,它是在学习化工原理理论课的基础上进行的实践性环节,是对理论教学的验证、补充和强化。在实践教学中引导学生运用已学过的知识验证一些结论、结果和现象,或综合运用所学理论知识设计实验和进行综合性实验,以训练学生对知识的运用能力、实验操作技能、仪器仪表的使用能力、实验数据的处理和分析能力,而且还能培养学生一丝不苟、严谨的工作作风和实事求是的工作态度。

本书是由长期工作在教学第一线的教师,在多年教学实践的基础上,结合学校实验仪器设备情况而编写的。教材编写过程中注意强调对学生多种实验能力和素质的培养与训练;做到概念清晰,层次分明,阐述简洁、易懂,便于学生自学;强调化工原理实验中的共性问题,有较强的通用性。全书共七章,涉及化工原理实验基础知识、基础实验、演示性实验、仿真实验四大部分内容。前四章介绍化工原理实验相关的基础知识和基本技能,包括实验的基本要求,实验安全注意事项与环保要求,实验数据测量及误差,实验数据的处理与实验设计方法,以及化工实验参数测量及常用仪器仪表,目的是在实验所涉及范围内,能够方便学生查取相关知识;第5章详细介绍了化工原理典型单元操作共12个实验,内容涵盖了验证性实验、设计性实验和综合性实验三大类。随着计算机的应用越来越广泛,我们也介绍了计算机数据采集的综合性实验和计算机仿真实验(第7章)。另外,为了增强学生对某些知识和现象的感性认识,第6章中介绍了一些演示实验。附录汇总了部分法定计量单位及其换算、化工常用参数、有关仪器的操作简介等。

本书由齐齐哈尔大学、大庆师范学院、东北农业大学三所院校老师共同编写,由齐齐哈尔大学李金龙、吕君、张浩任主编。各部分编写分工如下:第2章、第5章、第6章内容由齐齐哈尔大学李金龙编写;第4章由齐齐哈尔大学吕君编写;附录由齐齐哈尔大学隋国哲编写、整理;第1章、第3章由大庆师范学院张浩编写;第7章由东北农业大学邢志勇编写。全书由齐齐哈尔大学李金龙统稿。本书在编写过程中,朱宪荣、佟白、张伟光、邢进、邸凯等人做了大量的数据收集和文字整理工作,提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。同时还参考了近年来最新出版的有关化工原理实验书籍,在此向各位作者表示感谢。

由于本书涉及内容较广,编者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2012年4月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 化工原理实验的基本要求	1
1.2 实验安全注意事项与环保要求	12
第2章 实验数据测量及误差	22
2.1 误差的基本概念	22
2.2 误差的表示方法	25
2.3 “过失”误差的舍弃	27
2.4 间接测量中的误差传递	28
2.5 误差分析在阻力实验中的具体应用	29
2.6 提高分析结果精确度的方法	32
2.7 有效数字及其运算规则	32
第3章 实验数据的处理与实验设计方法	35
3.1 列表法	35
3.2 图示法	37
3.3 实验数据数学方程表示法	39
3.4 正交实验设计方法	49
第4章 化工实验参数测量及常用仪器仪表	59
4.1 测量技术基础知识	59
4.2 压力测量	62
4.3 流量测量	75
4.4 温度测量	91
4.5 液位测量	96
4.6 功率测量	99
4.7 阿贝折光仪	101
4.8 水分快速测定仪	103
4.9 计算机数据采集与控制	105
第5章 化工原理实验	112
5.1 柏努利方程实验	112
5.2 流体流动阻力实验	115
5.3 流量计校正及离心泵综合实验	120
5.4 过滤实验	127
5.5 正交试验法在过滤研究实验中的应用	130
5.6 总传热系数 K 的测定实验	133
5.7 强制对流下空气传热膜系数的测定	138
5.8 间歇精馏实验	144

5.9	连续精馏实验	147
5.9	二氧化碳吸收实验	153
5.10	填料塔流体力学性能实验	156
5.11	干燥实验	158
5.12	中空纤维超滤膜分离实验	162
第6章	演示实验	166
6.1	雷诺实验	166
6.2	电除尘实验	168
6.3	旋风分离器实验	171
6.4	边界层仪演示实验	173
6.5	筛板塔流体力学性能演示实验	175
第7章	化工原理计算机仿真实验	178
7.1	离心泵仿真实验	178
7.2	管路阻力仿真实验	180
7.3	传热仿真实验	180
7.4	流体流动状态仿真实验	181
7.5	柏努利方程演示仿真实验	182
7.6	吸收仿真实验	182
7.7	干燥仿真实验	183
7.8	精馏仿真实验	184
7.9	实验数据处理操作	185
7.10	实验知识测评操作	186
附录		187
附录1	法定计量单位及单位换算	187
附录2	化工原理实验中常用数据表	188
附录3	某些二元物系的气液平衡组成	193
附录4	某些气体溶于水的亨利系数	194
附录5	折 射 率 表	195
附录6	乙醇-正丙醇物系的温度-折射率-乙醇浓度关系	196
附录7	管子、管件的种类、用途及连接方法	196
附录8	电子天平使用说明	200
附录9	传热综合实验计算机数据采集系统	201
参考文献		203

第1章 绪 论

1.1 化工原理实验的基本要求

1.1.1 化工原理实验的地位和教学目的

化工原理是化工、制药、环境、轻化、生物工程等专业学生必修的一门专业基础课程。它主要研究生产过程中各种单元操作的规律,并利用这些规律解决实际生产中的过程问题,是一门实践性很强的技术基础课程。化工原理实验则是学习、掌握和运用这门课程必不可少的重要环节,它与理论教学和课程设计等教学环节构成一个有机的整体。化工原理实验属于工程实验范畴,与一般化学实验相比,不同之处在于它具有工程特点,有些实验具有中试规模工程或中间实验规模,所得到的结论,对于化工单元操作设备的设计,具有重要的指导意义。

通过化工原理实验教学不仅使学生巩固了对化工基本原理的理解,更重要的是对学生进行了系统和严格的工程实验训练,使学生在实验中增长新知识,培养学生对实验现象敏锐的观察能力、运用各种实验手段正确获取实验数据的能力、分析归纳实验数据和实验现象的能力、由实验数据和实验现象得出结论并提出自己见解的能力、增强创新意识和提高分析与解决工程实际问题的能力。

通过化工原理实验教学,力求达到以下教学目的。

1. 巩固和深化理论知识

在学习化工原理课程的基础上,进一步理解一些比较典型的、已被或将被广泛应用的化工过程与设备的原理和操作,巩固和深化化工原理的理论知识。

2. 为学生提供一个理论联系实际的机会

用所学的化工原理等化学化工的理论知识去解决实验中遇到的各种实际问题,同时学习如何在化工领域内通过实验获得新的知识和信息。

3. 培养学生从事科学实验的能力

实验能力主要包括:①为了完成一定的研究课题,设计实验方案的能力;②进行实验,观察和分析实验现象以及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运用文字表达技术报告的能力等。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

通过误差分析及数据整理,使学生严肃对待参数测量、取样等各个环节,注意观察实验中的各种现象,运用所学的理论去分析实验装置结构、操作等对测量结果的影响,严格遵守操作规程,集中精力进行观察、记录和思考。掌握数据处理方法,分析和归纳实验数据,实

事求是地得出实验结论,通过与理论比较,提出自己的见解,分析误差的性质和影响程度。培养学生严肃认真的学习态度和实事求是的科学态度,为将来从事科学研究和解决工程问题打好基础。

总之,化工原理实验教学的目的是着重于实践能力和解决实际问题能力的培养。这种能力的培养是课堂教学所无法替代的。

1.1.2 化工原理实验课程的教学内容

化工原理实验教学内容主要包括实验理论教学、计算机仿真实验和典型的单元操作实验三大部分。

1. 实验理论教学

实验理论教学主要讲述化工原理实验教学的目的、要求和方法;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和控制的基本知识等。

2. 计算机仿真实验

计算机仿真实验包括仿真运行、数据处理和实验测评三部分。

3. 典型单元操作实验

为了适应不同层次、不同专业的教学要求,我们把实验分为三个层次,即演示实验、基础实验和综合设计实验。

1.1.3 化工原理实验课程的教学方法

工程实验是一项技术工作,其本身就是一门重要的技术学科,有其自己的特点和系统。为了切实加强实验教学环节,因此将实验课单独设课。化工原理实验课程是由若干教学环节组成的,即实验理论课、撰写预习报告、实验前提问、实验操作、撰写实验研究报告和实验考核。实验理论课主要阐明实验基本原理、流程设计、测试技术及仪表的选择和使用方法、典型化工设备的操作、实验操作要点和数据处理注意事项等内容。实验前提问是为了检查学生对实验内容的掌握程度。实验操作是整个实验教学中最重要的环节,要求学生在该过程中能正确操作,认真观察实验现象,准确记录实验数据。实验研究报告应独立完成,并按照标准的科研报告形式撰写。

1.1.4 化工原理实验课程教学的基本要求

化工原理实验的设备多是工程装置,对学生来说往往是第一次接触。因此,会使学生感到陌生、无从下手。并且是几个人一组完成一个实验操作,如果在操作中互相配合不好,将直接影响实验结果。所以,为了切实增强教学效果,要求学生必须认真做好以下几个环节。

1. 实验前的预习

要满足达到实验目的中所提出的要求,仅靠实验原理部分是不够的,必须做到以下几点。

(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,清楚地掌握实验项目的要求、实验所依据的原理、实验步骤及所需测量的参数。熟悉实验所用测量仪表的使用方法,掌握其操作和 safety 注意事项。应试图对每个实验提出问题,带着问题到实验室现场

预习。

(2)到实验室现场熟悉设备装置的结构和流程,摸清测试点和控制点的位置。确定操作程序、所测参数项目、所测参数单位及所测数据点如何分布等。

(3)具有计算机辅助教学(CAI)手段时,可以让学生进行计算机仿真练习。通过计算机仿真练习,熟悉各个实验装置的组成、性能、实验操作步骤和注意事项,思考并回答有关问题,强化对基础理论和实验过程的理解,以增强实验效果。

(4)学生在预习和仿真练习的基础上写出实验预习报告。预习报告的内容应包括实验目的、原理、流程、操作步骤和注意事项等。准备好原始数据记录表格,并标明各参数的单位。

(5)特别要考虑一下设备的哪些部分或操作中哪个步骤会产生危险,如何防护,以保证实验过程中的人身和设备安全。不预习者不准做实验。预习报告经指导教师检查通过后方可进行实验。

2. 实验操作

一般以3~4人为一小组合作进行实验,实验前必须做好组织工作,做到既分工、又合作。每个组员要各负其责,并且要在适当的时候进行轮换工作,这样既能保证质量,又能获得全面的训练。

3. 实验数据的测定、记录和处理

(1)确定要测定哪些数据 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。并不是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、密度等物理性质,一般只要测出水温后即可查出,因此不必直接测定,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,而把其他受其影响或控制而随之改变的数据作为因变量,如离心泵特性曲线就把流量选择作为自变量,而把其他同流量有关的扬程、轴功率、效率等作为因变量。实验结果中往往要把这些所测的数据标绘在各种坐标系上,为了得到分布均匀的曲线,涉及到实验数据均匀分割的问题。化工原理实验最常用的有两种坐标: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:

①对于直角坐标系

$$x_i = x_{\min} \quad \Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{n - 1} \quad \Delta x_{i+1} = x_i + \Delta x$$

②对于双对数坐标

$$x_i = x_{\min} \quad \lg \Delta x = \frac{\lg x_{\max} - \lg x_{\min}}{n - 1}$$

所以

$$\Delta x = \left(\frac{x_{\max}}{x_{\min}} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad x_{i+1} = x_i \cdot \Delta x$$

(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。一般根据两次测定的读数相同或十分相近来判断操作系统已达稳定。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同一操作条件下,不同数据最好是数人同时读取,若操作者同时兼读几个数据时,应尽可能动作敏捷。

③每次读数都应与其他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(是现象反常还是读错了数据),并在记录上注明。

④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。例如秒表读数 1 分 23 秒,应记为 1'23",不要记为 83"。

⑤读取数据必须充分利用仪表的精度,读至仪表最小分度以下一位数,这个数应为估计值。如水银温度计最小分度为 0.1 °C,若水银柱恰好指到 22.4 °C 时,应记为 22.40 °C。注意,过多取估计值的位数是毫无意义的。

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的情况下,可取波动的最高点与最低点两个数据,然后取平均值。在波动不是很大时可取一次波动的高低点之间的中间值作为估计值。

⑥不要凭主观臆测修改记录数据,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。

⑦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给指导教师检查并签字,准确无误后方可结束实验。

(4) 数据的整理及处理。

①原始记录只可进行整理,绝不可以随便修改。经判断确实为过失误差造成的不正确数据需注明后剔除,不计入结果。

②采用列表法整理数据清晰明了,便于比较。一张正式实验报告一般包括四种表格: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。例如流体阻力实验中,计算 Re 和 λ 值,可按以下方法进行:

Re 的计算

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

其中, d, μ, ρ 在水温不变或变化甚小时可视为常数,合并为 $A = \frac{d \rho}{\mu}$, 故有

$$Re = A u \quad (1-2)$$

A 的值确定后,改变 u 值可算出 Re 值。

又例如,管内摩擦系数 λ 值的计算,由直管阻力计算公式

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

得

$$\lambda = \frac{d}{l} \cdot \frac{2}{\rho} \cdot \frac{\Delta P}{u^2} = B' \frac{\Delta P}{u^2} \quad (1-3)$$

式中常数 $B' = \frac{d}{l} \cdot \frac{2}{\rho}$ 。

又如实验中流体压降 ΔP , 用 U 型压差计读数 R 测定, 则

$$\Delta P = g R (\rho_0 - \rho) = B'' R \quad (1-4)$$

式中常数 $B'' = g(\rho_0 - \rho)$ 。

将 ΔP 代入式(1-4),整理为

$$\lambda = B' B'' \frac{R}{u^2} = B \frac{R}{u^2} \quad (1-5)$$

式中常数 $B = \frac{d}{l} \cdot \frac{2g(\rho_0 - \rho)}{p}$ 。

式(1-5)中仅有变量 R 和 u ,这样 λ 的计算非常方便。

④实验结果及结论用列表法、图示法或回归分析法来说明都可以,但均需标明实验条件。

4. 编写实验报告

实验报告是对实验工作的全面总结,实验报告是一份技术文件,是技术部门对实验结果进行评估的文字材料。实验报告必须写得简明、数据完整、结论明确、有讨论、有分析,得出的公式或图线有明确的使用条件。编写实验报告的能力也需要经过严格训练,为今后写好研究报告和科学论文打下基础。因此要求学生各自独立完成这项工作。化工原理实验具有显著的工程性,属于工程技术科学的范畴,它研究的对象是复杂的实际问题和工程问题。因此,化工原理的实验报告可以按传统实验报告格式或小论文格式编写。

1.1.5 实验报告的编写

1. 传统实验报告格式

本课程实验报告的内容应包括以下几项。

(1)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,实验日期。上述内容作为实验报告的封面。

(2)实验目的和内容 简明扼要地说明为什么要进行本实验,本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)实验装置流程示意图 简单地画出实验装置流程示意图和测试点、控制点的具体位置及主要设备、仪表。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)实验操作要点 根据实际操作程序将实验划分为几个步骤,并在前面加上序号,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 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,记录数据要准确,要根据仪表的精度决定实验数据有效数字的位数。

(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、加工成表格或图形的形式。表格要易于显示数据的变化规律及各参数的相关性;图要能直观地表达变量间的相互关系。

(9)数据处理计算过程举例 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。

(10)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。其主要内容

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分析误差的大小和原因,指出提高实验结果准确度的途径;
- ④将实验结果与前人或他人的结果对比,说明异同,并解释之;
- 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。

(11)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。

2. 小论文格式

科学论文有其特定的写作格式,其构成一般包括:标题、作者、单位、中英文摘要及关键词、前言、正文、结论(或结果讨论)、致谢、参考文献等。

(1)标题 标题又叫题目,是论文的总纲,是文献检索的依据,是全篇文章的实质与精华,也是引导读者判断是否阅读该文的一个依据。因此要求标题能准确地反映论文的中心内容。

(2)作者和单位 署名作者只限于那些选定研究课题和制定研究方案,直接参加全部或主要研究工作,作出主要贡献并了解论文报告的全部内容,能对全部内容负责解答的人。工作单位写在作者名下。

(3)摘要(Abstract) 撰写摘要的目的是让读者可以对本文研究了什么问题,用什么方法,得到什么结论,这些结果有什么意义等问题一目了然,是对论文内容不加注解和评论的概括性陈述,是全文的高度浓缩。一般是文章完成后,最后提炼出来的。摘要一般几十字至 300 字为宜。

(4)关键词(Key words) 关键词是将论文中起关键作用的、最能说明问题的、代表论文内容特征的或最有意义的词选出来,便于检索的需要。一篇论文可选 3~8 个关键词。

(5)前言 前言又叫引言、导言、序言等,是论文主体部分的开端。前言贵在言简意赅,条理清楚,不与摘要雷同。比较短的论文只要一小段文字作简要说明,而不用“前言”或“引言”两字。前言一般包括以下几项内容:

①研究背景和目的。说明从事该项研究的理由,其目的与背景是密不可分的,便于读者领会作者的思路,从而准确地领会文章的实质。

②研究范围。指研究所涉及的范围或所取得成果的适用范围。

③相关领域里前人的工作和知识空白。实事求是地交代前人已做过的工作或是前人并未涉足的问题,前人工作中有什么不足并简述其原因。

④研究方法。指研究采用的实验方法或实验途径。前言中只提及方法的名称即可,无须展开细述。

⑤预想结果和意义。简明扼要地提出本文将要解决什么问题以及解决这些问题有什么重要意义。

(6)正文部分 正文部分是论文的核心部分。这一部分的形式主要根据作者意图和文章内容决定,不可能也不应该规定一个统一的形式,下面介绍以实验为研究手段的论文或技术报告,包括以下几部分:

①实验原材料及其制备方法。

②实验所用设备、装置和仪器等。

③实验方法和过程。

说明实验所采用的是什麼方法,实验过程是如何进行的,操作上应注意什么问题。要突出重点,只写关键性步骤。如果是采用前人或他人的方法,只写出方法的名称即可;如果是自己设计的新方法,则应写得详细些。在此详细说明本文的研究工作过程,包括理论分析和实验过程,可根据论文内容分成若干个标题来叙述其演变过程或分析结论,每个标题的中心内容也是本文的主要结构之一。或者说整个文章有一个中心点,每个标题是其分论点,是从不同角度、不同层次进行论证、证明中心论点的一些观点,这些观点又可以看作是中心论点的论据。

(7)实验结果与分析讨论 这部分内容是论文的重点,是结论产生的基础。需对数据处理实验结果进一步加以整理,从中选出最能反映事物本质的数据或现象,并将其制成便于分析讨论的图或表。分析是指从理论(机理)上对实验所得的结果加以解释,阐明自己的新发现或新见解。写这部分时应注意以下几个问题:

①选取数据时,必须严肃认真,实事求是。选取数据要从必要性和充分性两方面去考虑,决不可随意取舍,更不能伪造数据。对于异常的数据,不要轻易删掉,要反复验证,查明是因操作差错造成的,还是事情本来就如此,或是意外现象。

②对图和表,要精心设计、制作,图要能直观地表达变量间的相互关系;表要易于显示数据的变化规律及各参数的相关性。

③分析问题,必须以事实为基础,以理论为依据。

总之,在结果与分析中既要包含所取得的结果,还要说明结果的可信度、再现性和误差,以及与理论或分析结果的比较、经验公式的建立上存在的问题,等等。

(8)结论(结束语) 结论是论文在理论分析和计算结果(实验结果)中分析和归纳的观点,它是以结果和讨论(或实验验证)为前提,经过严密的逻辑推理做出的最后判断,是整个研究过程的结晶,是全篇论文的精髓。据此可以看出研究成果的水平。

(9)致谢 致谢的作用主要是为了表示尊重所有合作者的劳动。致谢对象包括除作者以外所有对研究工作和论文写作有贡献、有帮助的人,如指导过论文写作的专家、教授,帮助收集和整理资料者,对研究工作和论文写作提过建议者等。

(10)参考文献 参考文献反映作者的科学态度和研究工作的依据,也反映作者对文献掌握的广度和深度,可提示读者查阅原始文献,同时也表示作者对他人成果的尊重。一般来说,前言部分所列的文献都应与主题有关;在方法部分,常需引用一定的文献与之比较;在讨论部分,要将自己的结果与同行的有关研究进行比较,这种比较都要以别人的原始出版物为基础。对引用的文献按其在论文中出现的顺序,用阿拉伯数字连续编码,并顺序排列。

被引用的文献为期刊论文的单篇文献时,著录格式为“顺序号. 作者. 题名[J]. 刊名,出版年,卷号(期号):引文所在的起止页码”。被引用的文献为图书、科技报告等整本文献时,著录格式为“顺序号. 作者. 文献书名[M]. 版本(第一版不标注). 出版地址:出版者,出版年:引用资料所在的起止页码”。其他出版物可参照科技论文参考文献引用格式,这里不再一一列举。

(11)附录 附录是在论文末尾作为正文主体的补充项目,并不是必需的。对于某些数

量较大的重要原始数据、篇幅过大不便于作正文的材料、对专业同行有参考价值的资料等可作为附录,放在论文的最后(参考文献之后)。

(12) 外文摘要 对于正式发表的论文,有些刊物要求要有外文摘要。通常是将中文标题(Topic)、作者(Author)、摘要(Abstract)及关键词(Key words)译为英文。排放位置因刊物而异。

用论文形式撰写“化工原理实验”的实验报告,可极大地提高学生写作能力、综合应用知识能力和科研能力;可为学生今后撰写毕业论文和工作后撰写学术论文打下坚实基础,是培养综合素质和能力的重要手段,应提倡这种形式的实验报告。但无论何种形式的实验报告,均应体现它的学术性、科学性、理论性、规范性、创造性和探索性。论文和参考文献的格式,具体参考国家标准 GB7713—1987《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》和 GB7714—1987《文后参考文献著录规则》。

实验报告必须力求简明、书写工整、文字通顺、数据完全、结论明确。图形图表的绘制必须用直尺、曲线板或计算机数据处理。

报告应在指定时间交给指导老师批阅。

1.1.6 化工原理实验课程的研究方法

工程实验不同于基础课程的实验,后者采用的方法是理论的、严密的,研究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验问题和工程问题,对象不同,实验研究方法必然不一样。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,困难可想而知。化学工程学科,如同其他工程学科一样,除了生产经验总结以外,实验研究是学科建立和发展的重要基础。多年来,化工原理在发展过程中形成的研究方法有直接实验法、因次分析法和数学模型法三种。

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,但它往往只能用到条件相同的情况,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。

对一个多变量影响的工程问题,为研究过程的规律,往往采用网格法规划实验,即依次固定其他变量,改变某一变量测定目标值。比如影响流体阻力的主要因素有:管径 d 、管长 l 、平均流速 u 、流体密度 ρ 、流体黏度 μ 及管壁粗糙度 ε , 变量数为 6, 如果每个变量改变条件次数为 10 次,则需要做 10^6 次实验,不难看出变量数是出现在幂上,涉及变量越多,所需实验次数将会剧增,因此实验需要在一定的理论指导下进行,以减少工作量,并使得到的结果具有一定的普遍性。因次分析法是化工原理广泛使用的一种研究方法。

2. 因次分析法

因次分析法所依据的基本理论是因次一致性原则和白金汉(Buckingham)的 π 定理。因次一致性原则是:凡是根据基本的物理规律导出的物理量方程,其中各项的因次必然相同。白金汉的 π 定理是:用因次分析所得到的独立的因次数群个数,等于变量数与基本因次数之差。

因次分析法是将多变量函数整理为简单的无因次数群的函数,然后通过实验归纳整理

出算图或准数关系式,从而大大减少实验工作量,同时也容易将实验结果应用到工程计算和设计中。

使用因次分析法时应明确因次与单位是不同的。因次又称量纲,是指物理量的种类;而单位是比较同一种类物理量大小所采用的标准,比如,力可以用牛顿、千克、磅来表示,但单位的种类同属质量类。

因次有两类:一类是基本因次,它们是彼此独立的,不能相互导出;另一类是导出因次,由基本因次导出。例如,在力学领域内基本因次有3个,通常为长度 $[L]$ 、时间 $[T]$ 、质量 $[M]$,其他力学的物理量的因次都可以由这3个因次导出,并可写成幂指数乘积的形式。

现设某个物理量的导出因次为 $Q: [Q] = [M^a L^b T^c]$,式中 a, b, c 为常数。如果基本因次的指数均为零,这个物理量称为无因次数(或无因次数群),如反映流体流动状态的雷诺数就是无因次数群。

因次分析法的具体步骤包括:

- (1) 找出影响过程的独立变量;
- (2) 确定独立变量所涉及的基本因次;
- (3) 构造因变量和自变量的函数式,通常以指数方程的形式表示;
- (4) 用基本因次表示所有独立变量的因次,得出各独立变量的因次式;
- (5) 依据物理方程的因次一致性原则和 π 定理得到准数方程;
- (6) 通过实验归纳总结准数方程的具体函数式。

以获得流体在管内流动的阻力和摩擦系数 λ 的关系式为例。根据摩擦阻力的性质和有关实验研究,得知由于流体内摩擦而出现的压力降 ΔP 与6个因素有关,写成函数关系式为

$$\Delta P = f(d, l, u, \rho, \mu, \varepsilon) \quad (1-6)$$

这个隐函数是什么形式并不知道,但从数学上讲,任何非周期性函数,用幂函数的形式逼近是可取的,所以化工上一般将其改为下列幂函数的形式:

$$\Delta P = K d^a l^b u^c \rho^d \mu^e \varepsilon^f \quad (1-7)$$

尽管式(1-7)中各物理量上的幂指数是未知的,但根据因次一致性原则可知,方程式等号右侧的因次必须与 ΔP 的因次相同,那么组合成几个无因次数群才能满足要求呢?由式(1-6)分析,变量数 $n=7$ (包括 ΔP),表示这些物理量的基本因次 $m=3$ (质量 $[M]$ 、长度 $[L]$ 、时间 $[T]$),因此根据白金汉的 π 定理可知,组成的无因次数群的数目为 $N=n-m=4$ 。

通过因次分析,将变量无因次化。式(1-7)中各物理量的因次分别是

$$\begin{aligned} \Delta P &= [ML^{-1}T^2] & d=l &= [L] & u &= [LT^{-1}] \\ \rho &= [ML^{-3}] & \mu &= [ML^{-1}T^{-1}] & \varepsilon &= [L] \end{aligned}$$

将各物理量的因次代入式(1-7),则两端因次为

$$ML^{-1}T^{-2} = KL^a L^b (LT^{-1})^c (ML^{-3})^d (ML^{-1}T^{-1})^e L^f$$

根据因次一致性原则,等号两边各基本量的因次的指数必然相等,可得方程组:

$$\text{对基本因次}[M] \quad d+e=1$$

$$\text{对基本因次}[L] \quad a+b+c-3d-e-f=-1$$

$$\text{对基本因次}[T] \quad -c-e=-2$$

此方程组包括3个方程,却有6个未知数,设用其中3个未知数 b, e, f 来表示 a, d, c ,解此方程组,可得:

$$\begin{cases} a = -b - c + 3d + e - f - 1 \\ d = 1 - e \\ c = 2 - e \end{cases} \quad \begin{cases} a = -b - e - f \\ d = 1 - e \\ c = 2 - e \end{cases}$$

将求得的 a, d, c 代入式(1-7), 即得:

$$\Delta P = K d^{-b-e-f} l^b u^{2-e} \rho^{1-e} \varepsilon^f \quad (1-8)$$

将指数相同的各物理量合并在一起得:

$$\frac{\Delta P}{u^2 \rho} = K \left(\frac{l}{d} \right)^b \left(\frac{du\rho}{\mu} \right)^{-e} \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^f \quad (1-9)$$

$$\Delta P = 2K \left(\frac{l}{d} \right)^b \left(\frac{du\rho}{\mu} \right)^{-e} \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^f \left(\frac{u^2 \rho}{2} \right) \quad (1-10)$$

将式(1-10)与计算流体在管内摩擦阻力的公式

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{d} \left(\frac{u^2 \rho}{2} \right) \quad (1-11)$$

相比较, 整理得到研究摩擦系数 λ 的关系式, 即

$$\lambda = 2K \left(\frac{du\rho}{\mu} \right)^{-e} \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^f \quad (1-12)$$

或

$$\lambda = \Phi \left(Re \cdot \frac{\varepsilon}{d} \right) \quad (1-13)$$

由以上分析可以看出: 在因次分析法的指导下, 将一个复杂的多变量的管内流体阻力的计算问题, 简化为摩擦系数 λ 的研究和确定。它是建立在正确判断过程影响因素的基础上, 进行了逻辑加工而归纳出的数群。上面的例子只能告诉我们: λ 是 Re 与 ε/d 的函数, 至于它们之间的具体形式, 归根到底还得靠实验来实现, 通过实验变成一种算图或经验公式用以指导工程计算和工程设计。著名的莫狄 (Moody) 摩擦系数图, 即“摩擦系数 λ 与 Re , ε/d 的关系曲线”就是这种实验的结果。许多实验研究了各种具体条件下的摩擦系数 λ 的计算公式, 其中较著名的, 如适用于光滑管的柏拉修斯 (Blasius) 公式:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$$

其他研究结果可以参看有关教科书及手册。

因次分析法有两点值得注意:

(1) 最终所得数群的形式与求解联立方程组的方法有关。在前例中如果不以 b, e, f 来表示 a, d, c , 而改为以 d, e, f 表示 a, b, c , 整理得到的数群形式就会不同。不过, 这些形式不同的数群通过互相乘除, 仍然可以变换成前例中所求得的 4 个数群。

(2) 必须对所研究的过程的问题有本质的了解, 如果有一个重要的变量被遗漏或者引进一个无关的变量, 就会得出不正确的结果, 甚至导致错误的结论。所以应用因次分析法必须持谨慎的态度。

从以上分析可知: 因次分析法通过将变量组合成无因次数群, 从而减少实验自变量的个数, 大幅度地减少实验次数。此外另一个极为重要的特性是, 若按式(1-6)进行实验时, 为改变 ρ 和 μ , 实验中必须换多种液体; 为改变 d , 必须改变实验装置 (管径)。而应用因次分析所得的式(1-10)指导实验时, 要改变 $du\rho/\mu$, 只需改变流速; 要改变 l/d , 只需改变测量段的距离, 即两测压点的距离。从而可以将水、空气等的实验结果推广应用于其他流体, 将小尺寸模型的实验结果应用于大型实验装置。因此实验前的无因次化工作是规划实验的

一种有效手段,在化工实验上运用广泛。

3. 数学模型法

(1) 数学模型法主要步骤 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将复杂问题作合理又不过于失真的简化,提出一个近似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,并测定模型参数。

(2) 数学模型法举例说明 以求取流体通过固定床的压降为例。固定床中颗粒间的空隙形成许多可供流体通过的细小通道,这些通道是曲折而且互相交联的,同时,这些通道的截面大小和形状又是很不规则的,流体通过如此复杂的通道时的压降自然很难进行理论计算,但我们可以用数学模型法来解决。

①物理模型 流体通过颗粒层的流动多呈层流状态,单位体积床层所具有的表面积对流动阻力有决定性的作用。这样,为解决压降问题,可在保证单位体积表面积相等的前提下,将颗粒层内的实际流动过程作如下大幅度的简化,使之可以用数学方程式加以描述。

将床层中的不规则通道简化成长度为 L_e 的一组平行细管,并规定:

a. 细管的内表面积等于床层颗粒的全部表面;

b. 细管的全部流动空间等于颗粒床层的空隙容积。

根据上述假定,可求得这些虚拟细管的当量直径 d_e 。

$$d_e = \frac{4 \times \text{通道的截面积}}{\text{润湿周边}} \quad (1-14)$$

分子、分母同乘 L_e , 则有

$$d_e = \frac{4 \times \text{床层的流动空间}}{\text{细管的全部内表面}} \quad (1-15)$$

以 1 m^3 床层体积为基准,则床层的流动空间为 ε ,每立方米床层的颗粒表面即为床层的比表面 a_B ,因此

$$d_e = \frac{4\varepsilon}{a_B} = \frac{4\varepsilon}{a(1-\varepsilon)} \quad (1-16)$$

按此简化的物理模型,流体通过固定床的压降即可等同于流体通过一组当量直径为 d_e ,长度为 L_e 的细管的压降。

② 数学模型 上述简化的物理模型已将流体通过具有复杂的几何边界的床层的压降简化为通过均匀圆管的压降。对此,可用现有的理论作如下数学描述:

$$h_f = \frac{\Delta P}{\rho} = \lambda \frac{L_e}{d_e} \frac{u_1^2}{2} \quad (1-17)$$

其中, u_1 为流体在细管内的流速。 u_1 可取为实际填充床中颗粒空隙间的流速,它与空床流速(表观流速) u 的关系为

$$u = \varepsilon u_1 \quad (1-18)$$

将式(1-16)(1-18)代入式(1-17)得

$$\frac{\Delta P}{L} = \left(\lambda \frac{L_e}{8L} \right) \frac{(1-\varepsilon)\alpha}{\varepsilon^3} \rho u^2 \quad (1-19)$$