



ABET

国家级精品资源共享课配套教材

国际工程教育认证系列教材

化工原理实验

史贤林 张秋香 周文勇 孙浩 编

HUAGONG YUANLI SHIYAN



化学工业出版社

国家级精品资源共享课配套教材

国际工程教育认证系列教材

化工原理实验

史贤林 张秋香 周文勇 孙浩 编



 化学工业出版社

北京 · 化学工业出版社

· 北京 ·

五洲印刷厂

《化工原理实验》以处理化学工程实际问题的实验研究方法为主线，着重于理论联系实际，强调研究方法和工程观念的培养，实用与理论兼顾。全书内容包括绪论、处理工程问题的实验研究方法论、实验规划与流程设计、实验误差分析与实验数据处理、化工测量技术及常用仪表和基础实验。基础实验一章包括流体流动阻力测定、离心泵特性曲线测定、过滤常数测定、对流给热系数测定、吸收塔的操作及吸收传质系数测定、精馏塔的操作与全塔效率测定、萃取塔的操作与萃取传质单元高度测定、干燥速率曲线测定。此外，还介绍一些选修实验与演示实验。

《化工原理实验》可作为高等学校化学工程与工艺及相关专业的实验教材，也可供化工、材料、环境、生物工程、医药、机械、自动化信息控制等领域从事研究、设计与生产的工程技术人员参考。

林姓姓姓姓姓姓姓姓姓姓姓
林姓姓姓姓姓姓姓姓姓姓姓

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理实验/史贤林等编. —北京: 化学工业出版社, 2019.2

国际工程教育认证系列教材

ISBN 978-7-122-33409-1

I. ①化… II. ①史… III. ①化工原理-实验-教材
IV. ①TQ02-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 283183 号

责任编辑: 徐雅妮 杜进祥
责任校对: 杜杏然

文字编辑: 马泽林
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 刷: 北京京华铭诚工贸有限公司

装 订: 三河市振勇印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 9 $\frac{1}{4}$ 字数 232 千字 2019 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888

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: 29.00 元

版权所有 违者必究

前言

《化工原理实验》是与陈敏恒等编写的《化工原理》(第四版,上下册)配套的实验教材,同时也是“化工原理国家级精品资源共享课”配套教材。

化工原理实验属于化学工程学科,不同于基础理论课程如物理学、化学、电子学等课程的实验,所涉及的研究对象均是复杂的化工过程实际问题,因而在处理问题的研究方法上具有鲜明的工程特点。

在化学工程学科长期的发展过程中,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学科基础理论的精华。为此,本书以处理工程实际问题的实验研究方法论作为主线贯穿始终,着重于培养学生的理论联系实际能力和正确的工程观念,这也是本书与国内同类教材的最大不同之处。在使用本书进行教学的过程中,可以以单元实验内容作为载体,有机地穿插介绍这些过程研究方法的应用。例如,结合流体力学实验着重介绍量纲分析理论为指导的相似放大(也称经验放大)方法;结合过滤实验介绍数学模型研究方法;结合传热实验、吸收实验等介绍过程分解与合成的研究方法等。此外,本书还结合各相关实验介绍了一些特殊的实验技术,如吸收实验中的简易恒压装置;吸收、精馏实验中的液封操作等。

本书遵循化工原理理论教材的内容顺序,概括了大部分的化工单元操作实验。在编写过程中,除了仍然以单元操作的过程研究和设备研究作为重点内容外,还特别注意加强学生的实验组织(规划)能力和流程设计能力,以培养学生的综合工程素质。

随着科学技术的飞速发展,新技术、新设备、新仪器不断涌现,教材的更新补充速度往往不及新技术发展的速度。因此,虽然在书中尽量向读者介绍了一些实用的新技术和新设备,但仍然着重于基本化工原理和基本概念的讲述,以期加强学生基础知识的掌握和基本观念的养成,从而能够在以后的工作中举一反三,触类旁通。

此外,随着化学工程学科国际交流的深入,化工安全意识是接轨 ABET 国际认证的重要指标之一,为此,本书还介绍了有关化工安全方面的必要知识。

本书由史贤林、张秋香、周文勇、孙浩等编写,华东理工大学化工原理教学中心教师参与了讨论与部分内容编写。其中绪论和第 1~3 章、第 6 章及第 5 章实验 3 由史贤林执笔;第 5 章实验 4~6 和插图由张秋香执笔和绘制;第 5 章实验 1、2、8 和第 7 章由周文勇执笔;第 5 章实验 7 和附录由孙浩执笔。此外,谢佑国参与编写了第 4 章,齐鸣斋编写了第 5 章实验 11。

须特别申明,本教材得以成书,皆赖于华东理工大学化学工程专业的前辈们几十年的研究基础,是华东理工大学化工原理教学中心的同事们集体教学研究成果的结晶,同时在编写过程中,也借鉴了国内各兄弟院校同类教材的编写经验,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏之处,恳请读者批评指正。

编者

2019 年 1 月

目录

绪论 1

- 0.1 化工原理实验课程的特点和重要性 1
- 0.2 化工原理实验课程的研究内容 1
- 0.3 化工原理实验教学方法及基本要求 3
 - 0.3.1 化工原理实验课程的教学方法 3
 - 0.3.2 化工原理实验教学基本要求 3
- 0.4 实验报告的撰写格式及要求 4

第1章 处理工程问题的实验研究

方法论 5

- 1.1 量纲理论指导下的实验研究方法 6
 - 1.1.1 问题的提出 6
 - 1.1.2 量纲分析理论 6
 - 1.1.3 量纲分析方法 8
 - 1.1.4 量纲分析方法和相似放大方法
应用举例 9
- 1.2 数学模型方法 12
 - 1.2.1 基本原理 12
 - 1.2.2 建立数学模型的一般步骤 13
 - 1.2.3 数学模型方法应用举例——流体通
过颗粒床层的流动问题 13
- 1.3 过程分解与合成方法 16
 - 1.3.1 流体输送系统特性的研究 17
 - 1.3.2 传热速率和传热系数的测定研究 17
 - 1.3.3 气体吸收传质过程的实验研究 19
- 1.4 过程变量分离方法 20
 - 1.4.1 低浓度吸收塔传质单元高度的
研究 20

1.4.2 板式精馏塔塔效率的实验研究 21

1.5 参数综合方法 21

第2章 实验规划与流程设计 23

- 2.1 实验规划及重要性 23
- 2.2 实验范围与实验布点 24
- 2.3 实验规划方法 25
 - 2.3.1 网格实验设计方法 25
 - 2.3.2 正交实验设计方法 26
 - 2.3.3 均匀实验设计方法 26
 - 2.3.4 序贯实验设计方法 27
- 2.4 实验流程设计 27
 - 2.4.1 流程设计的内容及一般步骤 27
 - 2.4.2 实验流程图的基本形式及要求 28

第3章 实验误差分析与实验数据

处理 29

- 3.1 误差的基本概念 29
 - 3.1.1 真值与误差 29
 - 3.1.2 实验误差的来源、分类及判别 29
 - 3.1.3 观测的准确度与精确度 30
- 3.2 实验数据的有效数字与计数法 30
 - 3.2.1 有效数字 30
 - 3.2.2 科学计数法 30
 - 3.2.3 有效数的运算 31
- 3.3 平均值 31
- 3.4 误差的表示方法 32
 - 3.4.1 离差 v_i 32
 - 3.4.2 算术平均误差 η 32

3.4.3	相对误差 d_r	32
3.4.4	示值误差	32
3.4.5	标准误差 σ	33
3.5	函数误差	33
3.5.1	函数误差的一般形式	33
3.5.2	某些函数误差的计算	34
3.5.3	误差传递公式在间接测量中的应用	35
3.6	实验数据处理的重要性	36
3.7	实验数据的处理方法	37
3.7.1	实验数据的列表法	37
3.7.2	实验数据的图示法	38
3.7.3	实验数据的数学模型法	42

第4章 化工测量技术及常用仪表 44

4.1	概述	44
4.2	流体压强的测量方法	44
4.2.1	液柱式压强(力)计	45
4.2.2	弹性式压强(力)计	46
4.2.3	电气式压强(力)计	47
4.2.4	测压仪表的选用	48
4.2.5	测压仪表的安装	48
4.3	流体流量的测量方法	49
4.3.1	速度式测量方法	50
4.3.2	体积式测量方法	52
4.3.3	质量式测量方法	53
4.3.4	常用流量测量仪表的选用	53
4.3.5	流量计的标定校正	55
4.4	流体温度的测量方法	55
4.4.1	接触式测温	56
4.4.2	测温仪表的比较和选用	57
4.4.3	接触式测温仪表的安装	59

第5章 基础实验 60

实验1	流体流动阻力测定实验	60
-----	------------	----

实验2	离心泵特性曲线测定实验	64
实验3	过滤常数测定实验	68
实验4	对流给热系数测定实验	77
实验5	吸收塔的操作及吸收传质系数测定实验	82
实验6	精馏塔的操作与全塔效率测定实验	89
实验7	萃取塔的操作与萃取传质单元高度测定实验	96
实验8	干燥速率曲线测定实验	102

第6章 选修实验 107

实验9	流量计流量校正实验	107
实验10	填料塔流体力学特性测定实验	110
实验11	吸附等温线与透过曲线测定实验	113
实验12	精馏过程的计算机模拟实验	116

第7章 演示实验 129

实验13	雷诺实验	129
实验14	流体机械能守恒与转化实验	130
实验15	离心泵汽蚀现象演示实验	132
实验16	板式塔流体力学现象演示实验	134

附录 136

附录1	实验室安全规章制度	136
附录2	涉用化学品安全信息说明	138

参考文献 142

绪 论

0.1 化工原理实验课程的特点和重要性

化工原理和化工原理实验是化学工程与工艺专业的主干专业基础课程，也是材料、环境、生工、食品、医药、机械、自动化信息控制等其他诸多相关专业的的主要课程之一。化工原理（又称单元操作）实验属于工程实验范畴，它是用自然科学的基本原理和工程实验方法来解决化工及相关领域的工程实际问题。化工原理实验的研究对象和研究方法与物理、化学等基础学科有明显不同。在基础学科中，较多的是以理想化的、简单的过程或模型作为研究对象，如物体在真空中的自由落体运动、理想气体的行为等，研究的方法也是基于理想过程或模型的严密数学推理方法。而工程实验则以实际工程问题为研究对象。对于化学工程问题，由于被加工的物料千变万化，设备大小和形状相差悬殊，涉及的变量繁多，实验研究的工作量之大之难是可想而知的。因此，面对实际的工程问题，需要人们采用不同于基础学科的实验研究方法，即处理实际问题的工程实验方法。化工原理实验就是一门以处理工程问题的方法论指导人们研究和处理实际化工过程问题的实验课程。

化工原理课程的教学在于指导学生掌握各种化工单元操作的基础理论、工程知识和计算方法，但仅有这些是远远不够的。由于化工过程问题的复杂性，有许多工程因素的影响仅从理论上是难以解释清楚的，或者虽然能从理论上做出定性的分析，但难以给出定量的描述，特别是有些重要的设计或操作参数，根本无法从理论上计算，必须通过必要的实验加以确定或获取。对于初步接触化工单元操作的学生或有关工程技术人员，更有必要通过实验来加深对有关过程及设备的认识和理解。因此，化工原理实验在化工原理教学过程中占有不可替代的重要地位和作用。

0.2 化工原理实验课程的研究内容

一个化工过程通常是由若干单元过程和设备组成，为了进行完善的设计和有效的操作，化学工程师必须掌握并正确判断有关设计或操作参数的可靠性，必须准确了解并把握设备的特性。对于物性数据，文献中已有大量发表的数据可供直接使用；设备的结构性能参数大多可从厂商提供的样本中获取。但还有许多重要的工艺参数，不能从文献中查取，或文献中虽有记载，但由于操作条件的变化，这些参数的可靠性难以确定。此外，化工过程的影响因素众多，有些重要工程因素的影响尚难以从理论上解释，还有些关键的设备特性和过程参数往往不能由理论计算而得。所有这些，都必须通过实验加以解决。因此，采取有效的实验研究方法，组织必要的实验以测取这些参数，或通过实验来加深理解基础理论知识的应用，掌握

某些工程观点,把握某些工程因素对操作过程的影响,了解单元设备的操作特性,不仅十分重要而且是十分必要的。

为了适应不同层次、不同专业的教学要求,本书共编写了12个典型的化工单元操作实验,即流体流动阻力测定实验、离心泵特性曲线测定实验、过滤常数测定实验、对流给热系数测定实验、吸收塔的操作及吸收传质系数测定实验、精馏塔的操作与全塔效率测定实验、萃取塔的操作与萃取传质单元高度测定实验、干燥速率曲线测定实验、流量计流量校正实验、填料塔流体力学特性测定实验、吸附等温线与透过曲线测定实验、精馏过程的计算机模拟实验。此外,书中也编写了雷诺实验、流体机械能守恒与转化(伯努利)实验、离心泵汽蚀现象演示实验和板式塔流体力学现象演示实验4个经典的演示实验。从教学目的和教学侧重点来看,上述实验内容大致可分为四类:前四个实验强调工程实验方法论的教学,中间四个实验侧重于过程的操作分析,后四个实验可归属于研究型实验,由于受教学时数的限制,一些经典的演示实验已不再作为教学重点,故归纳编入最后一章。

表0-1中归纳了化工原理实验课程中在化工上应用较普遍的化工单元操作的研究内容。

表0-1 化工原理实验课程中研究的化工单元过程问题及过程参数

单元操作	研究的化工单元过程问题及过程参数	实验参数的关联
流体输送	研究的问题:流体阻力,管路粗糙度 过程参数:摩擦系数 工程方法:量纲分析方法 工程知识点:流体阻力,机械能衡算	$\lambda = f(Re, \varepsilon/d)$ $h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2}$ $h_p = \zeta \frac{u^2}{2}$
流体输送机械 (离心泵)	研究的问题:离心泵特性,离心泵操作 过程参数:扬程,功率,效率 工程方法:直接实验方法,过程分解方法 工程知识点:离心泵特性,机械能衡算,离心泵工作点,泵的流量调节	$H = f_1(Q)$ $N = f_2(Q)$ $\eta = f_3(Q)$
过滤	研究的问题:过滤速率,过滤介质 过程参数:过滤常数 研究方法:数学模型方法,参数综合方法 工程知识点:过滤速率,过滤推动力与阻力	K, q_e
加热或冷却	研究的问题:对流传热系数 过程参数:传热系数 工程方法:量纲分析方法,过程分解与合成方法 工程知识点:传热速率,传热推动力与阻力,能量衡算	$Nu = f(Re, Pr)$ $Q = KA \Delta t_m$ $\frac{1}{KA} = \frac{1}{\alpha_0 A_0} + \frac{1}{\alpha_i A_i} + \frac{\delta}{\lambda A_m}$
吸收	研究的问题:吸收传质速率,吸收塔操作 过程参数:吸收传质系数或传质阻力 工程方法:过程分解与合成方法,变量分离方法,参数综合方法 工程知识点:物料衡算,传质速率,传质推动力与阻力,吸收剂三要素	$N_A = K_y a \Delta y_m V$ $\frac{1}{K_y a} = \frac{1}{K_y a} + \frac{m}{k_x a}$
精馏	研究的问题:精馏塔效率,精馏塔的操作 过程参数:效率 η ,回流比 R ,灵敏板温度,塔釜压力 工程方法:变量分离方法 工程知识点:物料衡算与采出率,塔板流体力学,精馏塔效率,精馏塔操作	$N = N_e / \eta$
萃取	研究的问题:萃取传质速率,萃取塔的操作 过程参数:传质单元高度,外加能量 工程方法:变量分离方法 工程知识点:萃取过程特点,外加能量,传质速率	$H = H_{OE} N_{OE}$ $H_{OE} = f(\psi)$

续表

单元操作	研究的化工单元过程问题及过程参数	实验参数的关联
干燥	研究的问题:干燥速率 过程参数:临界含水率,平衡含水率 工程方法:直接实验方法 工程知识点:干燥过程特点,干燥速率	$t=f_1(\tau), c=f_2(\tau)$ $dN/d\tau=f_3(\tau)$
吸附	研究的问题:吸附速率,吸附穿透曲线 过程参数:吸附平衡容量,传质系数,穿透点 工程方法:数学模型方法 工程知识点:吸附平衡,吸附穿透曲线	$x=x_m \frac{k_L c}{1+k_L c}$

按照化工与制药教学质量国家标准,化工原理实验课时为40~60学时,大致可安排6~8个不同类型的实验内容。针对不同层次、不同专业的教学对象,可对实验教学内容进行灵活的组合调整。

0.3 化工原理实验教学方法及基本要求

面对科学技术的迅猛发展,培养大批具有创新思维和创新能力强的高素质人才是时代对于高等学校的要求。对于化工及相关专业的学生,在掌握了必要的理论知识的基础上,还必须具备一定的原创开发实验研究能力,这些能力包括:对于过程有重要影响的工程因素的分析 and 判断能力;实验方案和实验流程的设计能力;进行实验操作、观察和分析实验现象的能力;正确选择和使用有关设备和测量仪表的能力;根据实验原始数据进行必要的数据处理以获得实验结果的能力;正确撰写实验研究报告的能力等。

只有掌握了扎实的基础理论知识并具备实验研究的综合能力,才能为将来独立地开展科研实验或进行过程开发打下坚实的基础。

0.3.1 化工原理实验课程的教学方法

化工原理实验课程由以下几个教学环节组成,即实验理论课(又称实验预习课)教学、撰写预习报告、实验前提问、实验操作、撰写实验研究报告、实验成绩考核。实验理论课主要阐明实验方法论、实验基本原理、实验方案和流程设计、测试技术及仪表的选择和使用方法、典型化工设备的操作、实验操作的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准备程度。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,严肃记录实验数据,并在实验结束后用计算机对实验数据进行处理,检查核对实验结果。实验研究报告应独立完成,并按标准的科研报告形式撰写。实验成绩考核以平时实验课综合表现为主,包括预习报告成绩、实验操作成绩和最终实验报告成绩。为了检查学生的独立学习情况和对所学知识的掌握程度,还可以视具体情况增加卷面考试(水平测试)。

0.3.2 化工原理实验教学基本要求

(1) 掌握处理工程问题的实验研究方法

化工原理实验课程中以有效处理工程问题的实验研究方法论为主线,正确掌握并灵活运用这些研究方法,对于培养学生的工程实践能力和过程研究开发能力是很有帮助的。在教学

过程中应结合具体实验内容重点介绍有关工程研究方法的应用。

(2) 熟悉化工数据的基本测试和仪表的选型及应用

化工数据包括物性参数(如密度、黏度、比热容等)、操作参数(如流量、温度、压力、浓度等)、设备结构参数(如管径、管长等)和设备特性参数(如阻力系数、传热系数、传质系数、功率、效率等)等数据。物性参数可从文献或有关手册中直接查取,设备特性参数一般要通过数据的计算整理而得到。而操作参数则需在实验过程中采用相应的测试仪表测取。学生应熟悉化工基本测试技术及仪表的使用方法,如传感器技术、热电偶技术、流量计、温度计、压力表的使用等。

(3) 熟悉并掌握化工典型单元设备的操作

化工原理实验装置在基本结构和操作原理方面与化工生产装置基本是相同的,所处理的问题也是化工过程的实际问题,学生应重视实验中设备的操作,通过操作了解有关影响过程的参数和装置的特性,并能根据实验现象调整操作参数,根据实验结果预测某些参数的变化对设备性能的影响。

(4) 掌握实验规划和流程设计的方法

正确地规划实验方案对于实验顺利开展并取得成功是十分重要的,学生要根据实验理论课的学习和有关实验规划设计理论知识,正确地制订详细可行的实验方案,并能正确设计实验流程,其中,特别要注意的是测试点(如流量、压力、温度、浓度等)和控制点的配置。

(5) 严肃记录原始数据,熟悉并掌握实验数据的处理方法

在实验过程中,学生应认真观察和分析实验现象,严肃记录原始实验数据,培养严肃认真的科学研究态度。要熟悉并掌握实验数据的常用处理方法,根据有关基础理论知识分析和解释实验现象,并根据实验结果总结归纳过程的特点或规律。

0.4 实验报告的撰写格式及要求

化工原理实验报告中应包括下述基本内容:

① 实验目的;

② 实验内容;

③ 实验基本原理;

④ 实验(设计)方案;

⑤ 实验装置及流程(图);

⑥ 原始数据记录;

⑦ 实验数据处理结果;

⑧ 实验结果分析与讨论。

在教学过程中,为了培养学生严肃认真的学习态度和一丝不苟的科学作风,可将实验报告分为两部分来撰写。第一部分为预习报告,包括上述①~⑥项内容。其中,第⑥项内容中只要求列出原始数据表格。实验预习报告应在实验操作前交给指导教师审阅,审阅通过后方能参加实验。学生在实验中将获得的数据填入原始数据表格,并在实验结束后完成实验报告的其余内容。

要强调的是,对于所开设的实验都配有计算机数据处理程序,学生在撰写实验数据处理部分内容时,除了要将计算机的处理结果全部附上外,还应有一组手算的计算过程示例。

第 1 章

处理工程问题的实验研究方法论

1.1 量纲理论指导下的实验研究方法 / 6

1.2 数学模型方法 / 12

1.3 过程分解与合成方法 / 16

1.4 过程变量分离方法 / 20

1.5 参数综合方法 / 21

前面提及,对化学工程问题实验研究的困难在于所涉及的物料千变万化,如物质、组成、相态、温度、压力均可能有所不同,设备形状尺寸相差悬殊,变量众多,如采用通常的实验研究方法,必须遍及所有的流体和一切可能的设备几何尺寸,其浩繁的实验工作量和实验难度是人们难以承受的。一般说来,若过程所涉及的变量为 n ,每个变量改变的次数(即水平数)为 m ,则所需的实验次数(i)为

$$i = m^n \quad (1-1)$$

以流体流动阻力实验为例:影响流体阻力 h_f 的变量有流体的密度 ρ 、黏度 μ 、管路直径 d 、管长 l 、管道壁面的粗糙度 ϵ 、流速 u 6个变量,即

$$h_f = f(u, d, l, \epsilon, \rho, \mu)$$

如果按一般的网格法组织实验,若每个变量改变10个水平,则实验的次数将达 10^6 之多。这样的实验必是旷时日久,费时费钱的。例如,为改变 ρ 、 μ 必须选用多种流体物料;为改变 d 、 l 、 ϵ 必须建设不同的实验装置。此外,设备参数和操作变量容易调节,物性参数有相互关联性,任何物性很难仅仅调节其中某一个参数。如为了考察 ρ 的影响而保持 μ 不变,一般做不到。

因此,针对工程实验的特殊性,必须采用有效的工程实验方法,才能达到事半功倍的效果。在化学工程基础理论的发展过程中,已形成了一系列行之有效的实验方法理论,在这些理论指导下的实验研究方法具有两个功效:一是能够“由此及彼”,二是可以“由小见大”,即借助于模拟物料(如空气、水、黄沙等)在实验室规模的小设备中,经有限的实验并加以理性的推断,从而得出工业过程的规律。这种在实验物料上能做到“由此及彼”、在设备上能“由小见大”的实验方法理论,正是化学工程基础理论精华的根本所在。

本章将介绍在处理化工过程实际问题中采用的一些实验研究方法,包括:量纲理论指导下的实验研究方法、数学模拟方法、过程分解与合成方法、过程变量分离方法,参数综合方法。

1.1 量纲理论指导下的实验研究方法

本节将阐述以量纲理论为指导的实验组织方法，以及基于量纲理论的“相似放大”方法，这也是将实验室的研究结果直接用于工业装置设计的所谓“经验放大”的主要理论基础。本节还通过典型事例详细介绍了这一方法在解决工程实际问题中的应用。

1.1.1 问题的提出

在化工过程中，当对某一单元操作过程的机理没有足够的了解，且过程所涉及的变量较多时，人们可以暂时撇开对过程内部真实情况的剖析而将其作为一个“黑箱”，通过实验研究外部条件（输入）与过程结果（输出）之间的关系及其动态特征，以掌握该过程的规律，并据此探索过程的内部结构和机理。在实验研究方法理论中，这种方法也称为“黑箱”法。

如上所述，流体湍流流动过程可用图 1-1 所示的“黑箱模型”表示。

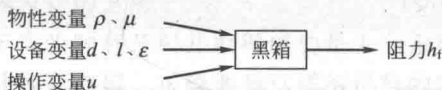


图 1-1 研究流体湍流流动阻力的“黑箱模型”

实验研究的任务是要找出 $h_f = f(u, d, l, \epsilon, \rho, \mu)$ 的函数形式并确定关联式中的有关参数。

在“黑箱”法中，过程的输入变量必须是可控的，过程的输出结果必须是可测的。然而，正如前面所讲，用直接实验方法研究流体流动阻力将面临实验工作量很大和实验难以组织（例如无法分别改变 ρ 、 μ ）的困难，而量纲分析理论指导下的实验研究方法则可以轻而易举地解决这种困难，并能达到“由此及彼”“由小见大”的功效。

1.1.2 量纲分析理论

1.1.2.1 几个基本概念

(1) 基本物理量，导出物理量

流体流动问题在物理上属于力学领域问题，在力学领域中，通常规定长度 l 、时间 t 和质量 m 这三个物理量为基本物理量，其他力学物理量，如速度 u 、压力 p 等可以通过相应的物理定义或定律导出，称为导出物理量。

(2) 量纲、基本量纲、导出量纲、量纲-特征数（量纲-数群）

量纲（又称因次，英文名称 Dimension）是物理量的表示符号，如以 $[L]$ 、 $[T]$ 、 $[M]$ 分别表示长度、时间和质量，则 $[L]$ 、 $[T]$ 、 $[M]$ 分别称为长度、时间和质量的量纲。

基本量纲 基本物理量的量纲称为基本量纲，力学体系中习惯上规定 $[L]$ 、 $[T]$ 、 $[M]$ 为三个基本量纲。

导出量纲 顾名思义，导出物理量的量纲称为导出量纲，导出量纲可根据物理定义或定律由基本量纲组合表示，例如：

速度 u ， $u = l/t$ ，其导出量纲为 $[u] = [L]/[T] = [LT^{-1}]$

加速度 a ， $a = l/t^2$ ，其导出量纲为 $[a] = [L]/[T^2] = [LT^{-2}]$

力 F ， $F = ma$ ，其导出量纲为 $[F] = [M][L]/[T^2] = [MLT^{-2}]$

压力 p 或应力 σ , p 或 $\sigma = F/A$, 其导出量纲为 $[P] = [MLT^{-2}]/[L^2] = [ML^{-1}T^{-2}]$

黏度 μ , $\mu = \sigma \frac{du}{dR}$, 其导出量纲为 $[\mu] = [ML^{-1}T^{-2}]/\frac{[LT^{-1}]}{[L]} = [ML^{-1}T^{-1}]$

密度 ρ , $\rho = m/l^3$, 其导出量纲为 $[\rho] = [M/L^3] = [ML^{-3}]$

量纲-特征数 又称量纲-数群, 由若干个物理量可以组合得到一个复合物理量, 组合的结果是该复合物理量关于基本量纲的指数均为零, 则称该复合物理量为量纲-特征数, 或称量纲-数群。如流体力学中的雷诺数

$$Re = du\rho/\mu$$

$$[Re] = \frac{[d][u][\rho]}{[\mu]} = \frac{[L][LT^{-1}][ML^{-3}]}{[ML^{-1}T^{-1}]} = [M^0L^0T^0] = [1]$$

1.1.2.2 重要定理

(1) 物理方程的量纲一致性定理

对于任何一个完整的物理方程, 不但方程两边的数值要相等, 等式两边的量纲也必须一致。此即为物理方程的量纲一致性定理或称量纲一致性原则。物理方程的量纲一致性原则是量纲分析方法的重要理论基础。

如物理学中的自由落体运动公式

$$S = u_0 t + \frac{1}{2} g t^2$$

等式左边 S 表示自由落体的距离, 其量纲为 $[L]$, 等式右边的量纲为 $[LT^{-1}][T] + [LT^{-2}][T^2] = [L]$, 可见, 方程两边的量纲是一致的。

此外, 在化学工程中还广泛应用着一些经验公式, 这些公式两边的量纲未必一致, 在具体应用时应特别注意其中各物理量的单位和公式的应用范围。

(2) π 定理 (Buckingham 定理)

如果在某一物理过程中共有 n 个变量 x_1, x_2, \dots, x_n , 则它们之间的关系原则上可用以下函数式表示

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1-2)$$

如若规定了 m 个基本变量, 则根据量纲一致性原则可将这些物理量组合成 $n-m$ 个量纲-特征数 $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}$, 则这些物理量之间的函数关系可用如下所示的 $n-m$ 个量纲-特征数之间的函数关系来表示

$$f_2(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (1-3)$$

此即为 Buckingham 的 π 定理。 π 定理可以从数学上得到证明。

在应用 π 定理时, 基本变量的选择要遵循以下原则:

- ① 基本变量的数目要与基本量纲的数目相等。
- ② 每一个基本量纲必须至少在此 m 个基本变量之一中出现。
- ③ 此 m 个基本变量的任何组合均不能构成量纲-特征数。

(3) 相似定理

- ① 相似的物理现象具有数值相等的相似特征数 (即量纲-特征数)。
- ② 任何物理现象的诸变量之间的关系, 均可表示成相似特征数之间的函数。
- ③ 当诸物理现象的等值条件 (即约束条件) 相似, 而且由单值条件所构成的决定性特征数的数值相等时, 这些现象就相似。

以上也称为相似三定理。需要说明的是, 相似特征数有决定性和非决定性之分, 决定性

特征数由单值条件所组成,若特征数中含有待求的变量,则该特征数即为非决定性特征数。

特征数函数最终是何种形式,量纲分析方法无法给出。基于大量的工程经验,最为简便的方法是采用幂函数的形式,例如,流体流动阻力的量纲-特征数关联式的形式为

$$E_u = CRe^a \left(\frac{l}{d}\right)^b$$

其中, $E_u = \frac{\Delta p}{\rho u^2}$, 称为欧拉特征数;

$Re = \frac{du\rho}{\mu}$, 称为雷诺特征数或流体运动特征数;

$\frac{l}{d}$, 称为几何特征数或几何相似特征数。

式中,常数 C 和指数 a, b 均为待定系数,须由实验数据拟合确定。

设有两种不同的流体在大小长短不同的两根圆管中作稳定流动,且知此两种流动现象彼此相似。若令 A 和 B 分别表示这两种现象,则按相似第一定理,有

$$\left(\frac{du\rho}{\mu}\right)_A = \left(\frac{du\rho}{\mu}\right)_B$$

$$\left(\frac{l}{d}\right)_A = \left(\frac{l}{d}\right)_B$$

$$\left(\frac{\Delta p}{\rho u^2}\right)_A = \left(\frac{\Delta p}{\rho u^2}\right)_B$$

反之,对于流动现象 A 和 B ,可分别以特征数函数式表示

$$E_{UA} = f_A \left[Re_A, \left(\frac{l}{d}\right)_A \right]$$

$$E_{UB} = f_B \left[Re_B, \left(\frac{l}{d}\right)_B \right]$$

若

$$Re_A = Re_B, \left(\frac{l}{d}\right)_A = \left(\frac{l}{d}\right)_B$$

依相似第三定律,则 A 和 B 必为相似现象,且有

$$E_{UA} = E_{UB}$$

相似定理在没有化学变化的化工工艺过程和装置的放大设计中有重要的作用,是工业装置经验放大设计的重要依据。

1.1.3 量纲分析方法

利用量纲分析理论建立变量的量纲-特征数函数关系的一般步骤如下:

① 变量分析 通过对过程的分析,从三个方面找出对物理过程有影响的所有变量,即物性变量、设备特征变量、操作变量,加上一个因变量,设共有 n 个变量 x_1, x_2, \dots, x_n , 写出一般函数关系式

$$F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

② 指定 m 个基本量纲,对于流体力学问题,习惯上指定 $[M]$ 、 $[L]$ 、 $[T]$ 为基本量纲,即 $m=3$ 。

③ 根据基本量纲写出所有各基本物理量和导出物理量的量纲。

④ 在 n 个变量中选定 m 个基本变量。

⑤ 根据 π 定理, 列出 $n-m$ 个量纲-特征数

$$\pi_i = x_i x_A^a x_B^b x_C^c \quad (i=1, 2, \dots, n-m, i \neq A \neq B \neq C)$$

式中, x_A, x_B, x_C ——选定的 $m(m=3)$ 个基本变量; x_i ——除去 x_A, x_B, x_C 之后所余下的 $(n-m)$ 个变量中之任何一个; a, b, c ——待定指数。

⑥ 将各变量的量纲代入量纲-特征数表达式, 依照量纲一致性原则, 可以列出各量纲-特征数的关于各基本量纲的指数的线性方程组, 求解这 $n-m$ 个线性方程组, 可求得各量纲-特征数中的待定系数 a, b, c , 从而得到各量纲-特征数的具体表达式。

⑦ 将原来几个变量间的关系式 $f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ 改为以 $(n-m)$ 个量纲-特征数之间的函数关系表达

$$F_2(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}) = 0$$

以函数 F_2 中的量纲-特征数作为新的变量组织实验, 通过对实验数据的拟合求得函数 F_2 的具体形式。

由此可以看到, 利用量纲分析方法可将 n 个变量之间的关系转变为 $n-m$ 个新的复合变量(即量纲-特征数)之间的关系。这在通过实验处理工程实际问题时, 不但可使实验变量的数目减少, 使实验工作量大为降低, 而且还可通过变量之间关系的改变使原来难以进行或根本无法进行的实验得以容易实现。因此, 把通过量纲分析理论指导组织实施实验的研究方法称为量纲理论指导下的实验研究方法。

1.1.4 量纲分析方法和相似放大方法应用举例

【例 1-1】 有一空气管路直径为 300mm, 管路内安装一孔径为 150mm 的孔板, 管内空气的温度为 200℃, 压力为常压, 最大气速 10m/s, 试估计空气通过孔板的阻力损失为多少?

为了测定工业高温空气管路中孔板在最大气速下的阻力损失, 可在实验室中采用直径为 30mm 的水管进行模拟实验。现在需要解决的问题是: ①在实验装置管路中模拟孔板的孔径应为多大? ②若实验水温为 20℃, 则水的流速应为多少才能使实验结果与工业情况相吻合? ③如实验测得模拟孔板的阻力损失为 20mmHg, 那么工业管路中孔板的阻力损失为多少?

下面采用量纲分析方法和相似放大方法解决这一工程问题。

解:

(1) 变量分析

根据有关流体力学的基础理论知识, 按物性变量、设备特征尺寸变量和操作变量三大类找出影响孔板阻力 h_f 的所有变量。物性变量: 流体密度 ρ 、黏度 μ ; 设备特征尺寸变量: 管径 d 、孔板孔径 d_0 ; 操作变量: 流体流速 u ; 因变量: 流体流动阻力 h_f 。

应说明的是, 流体的温度亦是一操作变量, 但温度的影响已隐含在流体的物性中(ρ, μ 均为温度的函数), 因而不再将温度视为独立变量, 在变量分析时不再计入。

因此

$$h_f = f(\rho, \mu, d, d_0, u)$$

或

$$f'(h_f, \rho, \mu, d, d_0, u) = 0$$

(2) 指定 m 个基本量纲

基本量纲为 $[M]$ 、 $[L]$ 、 $[T]$, 故 $m=3$ 。

(3) 根据基本量纲写出各变量的量纲

变量	h_f	ρ	μ	d	d_0	u
量纲	$[L^2 T^{-2}]$	$[ML^{-3}]$	$[ML^{-1} T^{-1}]$	$[L]$	$[L]$	$[LT^{-1}]$

(4) 在 n 个变量中选定 m 个基本变量

总变量数 $n=6$, $m=3$, 可选择 ρ, d, u 为基本变量, 该变量组合符合 π 定理中基本变量选择的原则规定。

(5) 根据 π 定理, 列出 $n-m=6-3=3$ 个量纲-特征数, 即

$$\pi_1 = h_f \rho^{a_1} d^{b_1} u^{c_1}, \quad \pi_2 = d_0 \rho^{a_2} d^{b_2} u^{c_2}, \quad \pi_3 = u \rho^{a_3} d^{b_3} u^{c_3}$$

(6) 将各变量量纲代入量纲-特征数表达式, 并按量纲一致性原则, 列出各量纲-特征数关于基本量纲指数的线性方程, 并求解。

对 π_1 , 有

$$[\pi_1] = [M^0 L^0 T^0] = [L^2 T^{-2}] [ML^{-3}]^{a_1} [L]^{b_1} [LT^{-1}]^{c_1}$$

可得

$$M: 0 = a_1, \quad L: 0 = 2 - 3a_1 + b_1 + c_1, \quad T: 0 = -2 - c_1$$

解上述线性方程组得

$$a_1 = 0, \quad b_1 = 0, \quad c_1 = -2$$

将 a_1, b_1, c_1 代入 π_1 表达式得

$$\pi_1 = h_f u^{-2} = h_f / u^2$$

对 π_2 , 有

$$[\pi_2] = [M^0 L^0 T^0] = [L] [ML^{-3}]^{a_2} [L]^{b_2} [LT^{-1}]^{c_2}$$

可得

$$M: 0 = a_2, \quad L: 0 = 1 - 3a_2 + b_2 + c_2, \quad T: 0 = -c_2$$

解上述线性方程组得

$$a_2 = 0, \quad b_2 = -1, \quad c_2 = 0$$

将 a_2, b_2, c_2 代入 π_2 表达式得

$$\pi_2 = d_0 d^{-1} = d_0 / d$$

对 π_3 , 有

$$[\pi_3] = [M^0 L^0 T^0] = [ML^{-1} T^{-1}] [ML^{-3}]^{a_3} [L]^{b_3} [LT^{-1}]^{c_3}$$

可得

$$M: 0 = 1 + a_3, \quad L: 0 = -1 - 3a_3 + b_3 + c_3, \quad T: 0 = -1 - c_3$$

解上述线性方程组得

$$a_3 = -1, \quad b_3 = -1, \quad c_3 = -1$$

所以

$$\pi_3 = \mu \rho^{-1} d^{-1} u^{-1} = \mu / d \rho u$$

或

$$\pi_3 = d \rho / \mu = Re$$

(7) 根据上述结果, 可将原来变量间的函数关系 $f'(h_f, \rho, \mu, d, d_0, u) = 0$ 简化为

$$F(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = F\left(\frac{h_f}{u^2}, \frac{d_0}{d}, \frac{dup}{\mu}\right)$$

又可表示为

$$\frac{h_f}{u^2} = F\left(\frac{d_0}{d}, \frac{dup}{\mu}\right)$$

按此式组织模拟实验。注意到在上述量纲分析过程中并没有注明流体是气体还是水。因此, 不论是气体管路还是水管, 只要 d_0/d 和 Re 相等, 根据相似定理, 方程左边 h_f/u^2 必相等。

根据相似定理, 模拟实验管路的孔板直径 d'_0 应与实际气体管路孔板保持几何相似

$$\frac{d'_0}{d'} = \frac{d_0}{d}$$

$$d'_0 = \frac{d_0}{d} d' = \frac{150}{300} \times 30 = 15 \text{ mm}$$

水的流速大小应保证实验管路中的 Re 与实际管路相等, 即流体流动形态相似

$$\frac{d' u' \rho'}{\mu'} = \frac{dup}{\mu}$$

$$u' = \frac{dup}{\mu} \frac{\mu'}{d' \rho'}$$

$$\text{空气的物性: } \rho = \frac{29}{22.4} \times \frac{273}{273+200} = 0.747 \text{ kg/m}^3, \quad \mu = 2.6 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$20^\circ\text{C 水的物性: } \rho' = 1000 \text{ kg/m}^3, \quad \mu' = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

代入上述相似式后, 水的流速

$$u' = \frac{0.3 \times 10 \times 0.747}{2.6 \times 10^{-5}} \times \frac{1 \times 10^{-3}}{0.03 \times 1000} = 2.87 \text{ m/s}$$

$$\text{模拟孔板的阻力损失 } h'_f = \frac{\Delta p'}{\rho'} = \frac{13600 \times 9.81 \times 0.02}{1000} = 2.67 \text{ J/kg}$$

实际孔板的阻力损失应与模拟孔板有如下关系

$$\frac{h_f}{u^2} = \frac{h'_f}{u'^2}$$

所以

$$h_f = \frac{h'_f}{u'^2} u^2 = \frac{2.67}{2.87^2} \times 10^2 = 32.4 \text{ J/kg}$$

从例 1-1 可以看出, 用量纲分析法处理工程问题, 不需要对过程机理有深刻全面的了解。在该例中, 原来 h_f 与 5 个变量之间的复杂关系, 通过量纲分析方法, 被简化为 h_f/u^2 与两个量纲-组合变量之间的函数关系, 使得实验工作量大为减小, 简化了实验。由于在模拟实验中保持了 d_0/d 和 dup/μ 与实际管路相等, 因此可用常温下的水代替 200°C 的高温空气, 用 30mm 的水管代替 300mm 的气体管路来进行实验。在实验物料上做到了“由此及彼”, 在设备尺寸上达到了“由小见大”, 实验结果解决了工业实际问题。

此外, 应用量纲分析方法, 还解决了一般实验方法对于某些变量无法组织实验的困难。例如在该例中, 如要分别考察 ρ 、 μ 对流动过程的影响, 由于 ρ 、 μ 同时受温度的影响而变