

普通高等教育“十二五”规划教材
国家级精品课程配套教材

CHEMICAL

ENGINEERING

化工原理实验

史贤林 张秋香
周文勇 潘正官 ◎ 主编

(第二版)

UNIT OPERATION

EXPERIMENT



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

普通高等教育“十二五”规划教材
国家级精品课程配套教材

化工原理实验

(第二版)

史贤林 张秋香 周文勇 潘正官 主编

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

· 上海 ·

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验/史贤林等主编. —2版. —上海:
华东理工大学出版社, 2015.9
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5628-4360-3

I. ①化… II. ①史… 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(2015)第 193935 号

化工原理实验(第二版)

主 编/史贤林 张秋香 周文勇 潘正官

责任编辑/周 颖

责任校对/金慧娟

出版发行/华东理工大学出版社有限公司

地址:上海市梅陇路130号,200237

电话:(021)64250306(营销部)

(021)64251837(编辑室)

传真:(021)64252707

网址:press.ecust.edu.cn

印 刷/常熟市华顺印刷有限公司

开 本/787 mm×1092 mm 1/16

印 张/10.5

字 数/251千字

版 次/2015年9月第2版

印 次/2015年9月第1次

书 号/ISBN 978-7-5628-4360-3

定 价/28.00元

联系我们:电子邮箱 press@ecust.edu.cn

官方微博 e.weibo.com/ecustpress

天猫旗舰店 <http://hdlgdxpbs.tmall.com>



第一版前言

本书是对应陈敏恒、丛德滋、方图南、齐鸣斋编写的《化工原理》(化学工业出版社)而编写的化工原理实验教材。

化工原理实验属于工程实验范畴,不同于基础理论课程如物理、化学等课程的实验。所涉及的研究对象均是复杂的化工过程实际问题,因而在处理问题的方法上具有鲜明的工程特点和特殊性。大学生在结束基础课程转入相关专业的学习阶段时,首先应在思维方法上要有一个根本的转变。

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学科基础理论的精华。为此,本书以处理工程实际问题的方法论贯穿始终,着重于培养学生的理论联系实际能力和工程观点,这也是本书与国内同类教材的最大不同之所在。在教学过程中,注意加强学生的实验组织(规划)和流程设计能力,这对于培养学生的科学研究方法和工程实践能力是十分重要的。所以,虽然这些内容在有关的教材或著作中有所涉及,本书还是以简洁的篇幅进行了论述。书中的主体内容基本上是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。鉴于目前专业教学时数的限制,有些经典的演示实验已不再作为教学重点,因此,将这些演示实验内容集中安排在本书末章中。

本书由史贤林、田恒水、张平主编,华东理工大学化工原理实验室的全体教师参与了讨论与部分内容的编写。其中第4章由谢佑国执笔,第8章由张平执笔,第9章由李玉安执笔,第10章由张秋香执笔,第12章由周文勇执笔,第15章由齐鸣斋执笔,插图由张秋香绘制,路明辉打印了全篇文稿,史贤林进行了统稿和修改。全书承谭天恩和齐鸣斋教授审阅。

本教材之成书,皆赖于华东理工大学化学工程前辈几十年之研究基础,又借鉴了国内各兄弟院校同类教材之经验。因此,为免烦冗,除必要的参考书目在每章末列出外,国内出版的同类教材一般不再列出,在此一并表示感谢。在成书过程中,还得到了华东理工大学教务处的专题立项资助,特此致谢。

本书得以出版,可以说是集体努力的结晶。由于编者自身的学识有限,书中欠妥之处一定甚多,期望读者本着扶持之精神,尽量指出不足,以助修正。

编者

2004年12月

第二版前言

本书是对应陈敏恒、丛德滋、方图南、齐鸣斋编写的《化工原理》(化学工业出版社)而编写的,也是“化工原理国家精品课程”的配套教材。

《化工原理实验》自 2005 年出版以来已使用十年之久,其间,不仅课程教学的理念发生了很大变化,而且化工设备和测试仪表技术水平也有了巨大进步,新设备和新仪表不断涌现且在实际工业生产和教学科研中得到广泛应用。所以,原实验教材已不适合于现有的实验教学装置和教学内容,这也是改版的主要理由。

此次修订由史贤林、张秋香、周文勇和潘正官主笔,主要针对实验装置的改进和先进测试技术的应用对相关章节内容进行了修改,重点对流体流动阻力实验、离心泵特性实验、过滤实验、传热实验、吸收实验、精馏实验、萃取实验和干燥实验的实验装置流程图进行了更换或修改,对实验装置流程和操作要点的叙述做了修改和完善。此外,在实验中还采用了许多先进的测试和控制技术手段,例如,在阻力实验中采用了压差传感器技术,在离心泵实验中采用了变频调速技术,在过滤实验中采用了计算机在线检测技术,在吸收实验中采用了在线色谱技术,在精馏实验中采用了仪表控制操作技术等。为此,在第 4 章增加了一节,专门介绍有关智能检测仪表的基础知识。

处理工程实际问题的实验研究方法是化学工程学科基础理论的精华。因此,在第二版中坚持特色,强调以处理工程实际问题的方法论作为主线贯穿全书始终。在教学过程中,以单元实验内容作为载体,可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以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,结合精馏实验和萃取实验介绍变量分离的研究方法等。这对于培养学生正确的科学研究思路和综合的工程分析能力是十分重要的。

作者对华东理工大学化工原理教学中心的同事们在本书修订过程中所给予的帮助表示感谢。

编者

2015 年 6 月

目 录

绪 论	1
参考文献	5
1 处理工程问题的实验研究方法论	6
1.1 量纲理论指导下的实验研究方法	6
1.2 数学模型法	14
1.3 过程分解与合成法	18
1.4 过程变量分离法	23
1.5 参数综合法	24
参考文献	25
2 实验规划和流程设计	26
2.1 实验规划的重要性	26
2.2 实验范围与实验布点	27
2.3 实验规划方法	27
2.4 实验流程设计	30
参考文献	31
3 实验误差分析和实验数据处理	33
3.1 实验误差分析的重要性	33
3.2 实验数据的有效数字与计数法	34
3.3 平均值	35
3.4 误差的表示方法	36
3.5 函数误差	37
3.6 实验数据处理的重要性	41
3.7 实验数据处理的方法	41
参考文献	51
4 化工测量技术及常用仪表	53
4.1 概述	53

4.2	流体压强的测量方法	53
4.3	流体流量的测量方法	59
4.4	流体温度的测量方法	66
4.5	常用智能数字显示仪表	70
	参考文献	75
5	流体流动阻力的测定实验	76
5.1	实验内容	76
5.2	实验目的	76
5.3	实验基本原理	76
5.4	实验设计	78
5.5	实验操作要点	80
5.6	实验数据处理和结果分析讨论的要求	80
5.7	思考题	80
	参考文献	80
6	离心泵特性曲线的测定实验	81
6.1	实验内容	81
6.2	实验目的	81
6.3	实验基本原理	81
6.4	实验设计	83
6.5	实验操作要点	85
6.6	实验数据处理和结果分析讨论的要求	85
6.7	思考题	85
	参考文献	85
7	过滤常数的测定实验	86
7.1	实验内容	86
7.2	实验目的	86
7.3	实验基本原理	86
7.4	实验设计	89
7.5	实验操作要点	90
7.6	实验数据处理和结果分析讨论的要求	91
7.7	思考题	91
	参考文献	91
	附录 过滤实验在线数据采集系统软件使用方法	91
8	对流给热系数的测定实验	95
8.1	实验内容	95

8.2	实验目的	95
8.3	实验基本原理	95
8.4	实验设计	98
8.5	实验操作要点	99
8.6	实验数据处理和结果分析讨论的要求	100
8.7	思考题	100
	参考文献	101
9	吸收塔的操作和吸收传质系数的测定实验	102
9.1	实验内容	102
9.2	实验目的	102
9.3	实验基本原理	102
9.4	实验设计	107
9.5	实验操作要点	109
9.6	实验数据处理和结果分析讨论的要求	109
9.7	思考题	109
	参考文献	110
	附录 丙酮在水与空气中的相平衡数据表	110
10	精馏塔的操作和全塔效率的测定实验	111
10.1	实验内容	111
10.2	实验目的	111
10.3	实验基本原理	111
10.4	实验设计	116
10.5	实验操作要点	117
10.6	实验数据处理和结果分析讨论的要求	118
10.7	思考题	118
	参考文献	119
	附录 乙醇-水二元物系的气液平衡数据(101.3kPa)	119
11	液液萃取塔的操作和萃取传质单元高度的测定实验	120
11.1	实验内容	120
11.2	实验目的	120
11.3	实验基本原理	120
11.4	实验设计	124
11.5	实验操作要点	125
11.6	实验数据处理和结果分析讨论的要求	126
11.7	思考题	127

参考文献	127
12 干燥速率曲线的测定实验	128
12.1 实验内容	128
12.2 实验目的	128
12.3 实验基本原理	128
12.4 实验设计	130
12.5 实验操作要点	131
12.6 实验数据处理和结果分析讨论的要求	132
12.7 思考题	133
参考文献	133
13 流量计的流量校正实验	134
13.1 实验内容	134
13.2 实验目的	134
13.3 实验基本原理	134
13.4 实验装置	136
13.5 实验操作原则	137
13.6 实验数据处理的要求	137
13.7 思考题	137
参考文献	137
14 填料塔流体力学特性实验	138
14.1 实验内容	138
14.2 实验目的	138
14.3 实验基本原理	138
14.4 实验装置	140
14.5 实验研究及数据整理方法	140
14.6 实验数据处理的要求	141
14.7 思考题	141
参考文献	141
15 吸附透过曲线的测定实验	142
15.1 实验内容	142
15.2 实验目的	142
15.3 实验基本原理	142
15.4 实验装置	143
15.5 实验操作要点	143

15.6	实验数据处理	145
15.7	思考题	145
	参考文献	145
16	精馏过程的计算机模拟实验	146
16.1	实验内容	146
16.2	实验目的	146
16.3	实验基本原理	146
16.4	模拟实验过程	148
16.5	模拟实验结果的处理和分析	148
17	演示实验	149
17.1	雷诺实验	149
17.2	流体机械能的转化实验	151
17.3	离心泵的汽蚀现象	152
17.4	板式塔的流体力学现象	154
	参考文献	155

绪 论

1. 化工原理实验课程的特点和重要性

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,较多地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降落运动、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的数学推理方法;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,要求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工程知识和计算方法,但仅学会这些是远远不够的。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。

2. 化工原理实验课程的研究内容

一个化工过程往往由很多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,不能由文献查取,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。

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

表 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, 管壁粗糙度 过程参数: 摩擦系数 工程方法: 量纲分析法 工程知识点: 流体阻力, 机械能衡算	$\lambda = f(Re, \epsilon/d)$ $h_f = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{u^2}{2}, h_t = \zeta \cdot \frac{u^2}{2}$
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	$H_e = f_1(q_V)$ $\eta = f_2(q_V)$ $P_a = f_3(q_V)$
过滤	研究的问题: 过滤速率, 过滤介质 过程参数: 过滤常数 工程方法: 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_c
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	$Nu = f(Re, Pr)$ $Q = K \cdot A \cdot \Delta t_m$ $\frac{1}{KA} = \frac{1}{\alpha_0 A_0} + \frac{1}{\alpha_i A_i} + \frac{\delta}{\lambda A_m}$
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	$N_A = K_y a \cdot \Delta y_m \cdot V$ $\frac{1}{K_y a} = \frac{1}{k_y a} + \frac{m}{k_x a}$
精馏	研究的问题: 精馏塔效率, 精馏塔的操作 过程参数: 全塔效率 E_T , 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	$E_T = \frac{N_T - 1}{N}$
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	$H = H_{OE} \cdot N_{OE}$ $H_{OE} = f(\nu)$
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	$t = f_1(\tau), c = f_2(\tau)$ $\frac{dN}{d\tau} = f_3(\tau)$
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	$x = x_m \frac{k_L c}{1 + k_L c}$

为了适应不同层次、不同专业的教学要求,本教材共编写了 12 个典型的化工单元操作实验,即流体流动阻力的测定实验、离心泵特性曲线的测定实验、过滤常数的测定实验、对流传热系数的测定实验、吸收塔的操作及吸收传质系数的测定实验、精馏塔的操作和全塔效率的测定实验、萃取塔的操作和萃取传质单元高度的测定实验、干燥速率曲线的测定实验、流量计流量校正实验、填料塔流体力学特性实验、吸附穿透曲线测定实验、精馏过程的计算机模拟实验,以及雷诺实验、流体机械能守恒与转化实验、离心泵汽蚀现象实验和板式塔流体力学现象实验等 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 4 类:前 4 个实验强调工程实验方法论的教学,中间 4 个实验侧重于过程的操作分析,后 4 个实验可归属于研究型实验,由于受教学学时数的限制,一些经典的演示实验已不再作为教学重点,故编入最后一章。

按照原全国化工原理教学指导委员会的建议,化工原理实验课时约为 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,可对实验教学内容灵活地进行组合调整。

3. 化工原理实验教学方法及基本要求

面对 21 世纪科学技术的迅猛发展,培养大批具有创新思维和创新能力的素质人才是时代对于高等学校的要求。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:对于过程有影响的重要工程因素的分析 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学研究或进行过程开发打下坚实的基础。

(1) 化工原理实验课程的教学方法

化工原理实验课程由若干教学环节组成,即实验理论课(又称实验预习课)、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)。

(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贯穿着处理工程问题的实验研究方法论的主线,这些方法对于处理工程实际问题是行之有效的,正确掌握并灵活运用这些方法,对于培养学生的工程实践能力和过程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技术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)等数据。物性数据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,而操作参数则需在实验过程中采用相应的测试仪表测取。学生应熟悉化工常用测试技术及仪表的使用方法,如流量计、温度计、压力表、传感器技术、热电偶技术等。

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。

4. 实验研究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) 实验内容;
- (2) 实验目的;
- (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;
- (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,包括上述第(1)~第(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,获得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。

参考文献

- [1] 陈敏恒,丛德滋,方图南,齐鸣斋. 化工原理. 3 版. 北京:化学工业出版社,2006.
- [2] 陈敏恒,方图南,丛德滋. 化工原理教与学. 北京:化学工业出版社,1996.
- [3] 陈同芸,瞿谷仁,吴乃登. 化工原理实验. 上海:华东理工大学出版社,1993.
- [4] Bodman S A. 化工过程工程工业实践. 曲德林,曾宪舜,译. 北京:清华大学出版社,1985.

1 处理工程问题的实验研究方法论

前面提及,对化工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,变量数量众多,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。一般来说,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 ,所需的实验次数为

$$i = m^n$$

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 等 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,则实验的次数将多达 10^6 次。这样的实验必是旷日持久,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,为考察 ρ 的影响而保持 μ 不变则又往往是难以做到的。

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、数学模型法、过程分解与合成法、过程变量分离法及参数综合法等。

1.1 量纲理论指导下的实验研究方法

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。

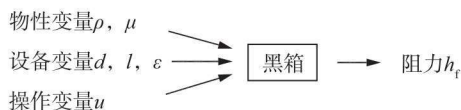


图 1-1 研究湍流流动阻力的“黑箱模型”

实验研究的任务是要找出: $h_f = f(u, d, l, \epsilon, \rho, \mu)$ 的函数形式及式中的有关参数。

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. 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、量纲一准数(量纲一数群)

量纲(Dimension) 它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:

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

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

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

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

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

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

量纲一准数 又称量纲一数群,由若干个物理量可以组合得到一个复合物理量,组合的结