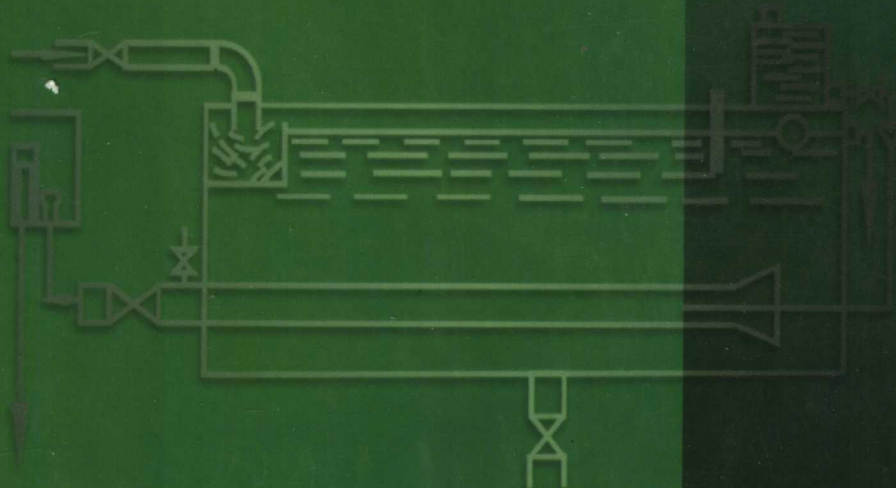


国家精品课程配套使用教材

化工原理 实验

Experiments
Of Chemical Engineering Principles

史贤林 田恒水 张 平 主编



2-33



华东理工大学出版社

EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

国家精品课程配套使用教材

化工原理实验

史贤林 田恒水 张 平 主编

 华东理工大学出版社

内 容 提 要

本书是一本化工原理实验教材,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、实验误差分析和数据处理、化工测量技术及常用仪表、流体流动阻力测定、离心泵特性曲线测定、过滤常数测定、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、萃取塔的操作与传质单元高度测定、干燥速率曲线的测定、流量计流量校正实验、填料塔流体力学特性实验、吸附实验、精馏过程的计算机模拟实验、演示实验等共十八章。本书以处理工程问题的实验研究方法为主线并贯穿于整篇教材中,着重于理论联系实际,并强调研究方法和工程观点的培养,实用与理论兼顾。可作为高等学校化学化工及相关专业的实验教材,亦可作为化工、材料、环境、生工、医药、机械、自动化信息控制等部门从事研究、设计与生产的工程技术人员的技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验/史贤林,田恒水,张平主编. —
上海:华东理工大学出版社,2005.3
ISBN 7-5628-1672-7

I. 化... II. ①史... ②田... ③张... 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(2005)第 008999 号

化工原理实验

史贤林 田恒水 张 平 主 编

出版	华东理工大学出版社	开本	787×960 1/16
社址	上海市梅陇路 130 号	印张	11.5
邮编	200237 电话(021)64250306	字数	210 千字
网址	www.hdlgpress.com.cn	版次	2005 年 3 月第 1 版
发行	新华书店上海发行所	印次	2005 年 3 月第 1 次
印刷	上海展强印刷有限公司	印数	1-4050 册
ISBN 7-5628-1672-7 TQ·96		定价:18.00 元	

序

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验问题的有效方法,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教材末章中。

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,插图由张杰旭绘制,路明辉打印了全篇文稿,史贤林进行统稿和修改。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,为免繁冗,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

目 录

绪论	1
1 处理工程问题的实验研究方法论	6
1.1 因次论指导下的实验研究方法	7
1.2 数学模型方法	16
1.3 过程分解与合成方法	21
1.4 过程变量分离方法	27
1.5 参数综合方法	28
2 实验规划和流程设计	30
2.1 实验规划的重要性	30
2.2 实验范围与实验布点	31
2.3 实验规划方法	33
2.4 实验流程设计	35
3 实验误差分析与实验数据处理	38
3.1 实验误差分析的重要性	38
3.2 实验数据的有效数字与计数法	39
3.3 平均值	40
3.4 误差的表示方法	42
3.5 函数的误差	43
3.6 实验数据处理的重要性	47
3.7 实验数据处理的方法	48
4 化工测量技术及常用仪表	61
4.1 概述	61
4.2 流体压强的测量方法	61
4.3 流体流量的测量方法	68
4.4 流体温度的测量方法	76
5 流体流动阻力的测定实验	83
5.1 实验内容	83
5.2 实验目的	83
5.3 实验基本原理	83
5.4 实验设计	85

5.5	实验操作要点	87
5.6	实验数据处理和结果讨论分析部分的要求	88
5.7	思考题	88
6	离心泵特性曲线的测定实验	90
6.1	实验内容	90
6.2	实验目的	90
6.3	基本原理	90
6.4	实验设计	93
6.5	实验操作要点	94
6.6	实验数据处理和结果讨论分析部分的要求和建议	95
6.7	思考题	96
7	过滤常数的测定实验	97
7.1	实验内容	97
7.2	实验目的	97
7.3	实验基本原理	97
7.4	实验设计	100
7.5	实验操作要点	102
7.6	实验数据处理和结果分析讨论部分的要求	103
7.7	思考题	103
8	对流给热系数的测定实验	105
8.1	实验内容	105
8.2	实验目的	105
8.3	实验基本原理	105
8.4	实验设计	108
8.5	操作要点	111
8.6	实验数据处理和结果讨论部分的要求	111
8.7	思考题	111
9	吸收塔的操作和吸收传质系数的测定实验	113
9.1	实验内容	113
9.2	实验目的	113
9.3	实验基本原理	113
9.4	实验设计	119
9.5	实验要点	121
9.6	实验数据处理和结果分析讨论部分的要求	121

9.7 思考题	122
10 精馏塔的操作和全塔效率的测定实验	123
10.1 实验内容	123
10.2 实验目的	123
10.3 实验原理	123
10.4 实验设计	128
10.5 实验操作要点	131
10.6 数据处理和结果分析讨论部分的要求	131
10.7 思考题	131
11 萃取塔的操作和萃取传质单元高度的测定实验	133
11.1 实验内容	133
11.2 实验目的	133
11.3 实验基本原理	133
11.4 实验设计	137
11.5 实验操作要点	140
11.6 实验数据处理和结果分析讨论部分的要求	141
11.7 思考题	141
12 干燥速率曲线的测定实验	142
12.1 实验内容	142
12.2 实验目的	142
12.3 实验基本原理	142
12.4 实验设计	145
12.5 实验操作要点	147
12.6 实验数据处理及结果分析讨论部分的要求	147
12.7 思考题	147
13 流量计流量校正实验	149
13.1 实验内容	149
13.2 实验目的	149
13.3 基本原理	149
13.4 实验装置	151
13.5 实验操作原则	152
13.6 实验报告中实验结果部分的要求	152
13.7 思考题	153

14 填料塔流体力学特性实验	154
14.1 实验内容	154
14.2 实验目的	154
14.3 实验基本原理	154
14.4 实验装置	156
14.5 实验研究及数据整理方法	157
14.6 实验报告中实验结果部分的要求	157
14.7 思考题	158
15 吸附穿透曲线测定实验	159
15.1 实验内容	159
15.2 实验目的	159
15.3 基本原理	159
15.4 实验装置	161
15.5 实验操作要点	162
15.6 实验数据处理	163
15.7 思考题	163
16 精馏过程的计算机模拟实验	164
16.1 实验内容	164
16.2 实验目的	164
16.3 实验基本原理	164
16.4 模拟实验过程	166
16.5 模拟实验结果的处理和分析	167
17 演示实验	168
17.1 雷诺实验	168
17.2 流体机械能守恒与转化实验	170
17.3 离心泵汽蚀现象演示实验	172
17.4 板式塔流体力学现象演示实验	174

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,但仅有这些是远远不够的。由于化工过程问题的复杂性,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,但难于给出定量的描述,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。

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,不能够由文献查取,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研究解决。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,管路粗糙度 过程参数:摩擦系数 工程方法:因次分析方法 工程知识:流体阻力、机械能衡算	$\lambda = f(Re, \epsilon/d)$ $h_f = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{u^2}{2}$ $h_p = \zeta \cdot \frac{u^2}{2}$
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: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 工程方法:数学模型方法,参数综合方法 工程知识: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:因次分析方法,过程分解与合成方法 工程知识:传热速率,传热推动力与阻力能量衡算	$Nu = f(Re, Pr)$ $Q = K \cdot A \cdot \Delta t_m$ $\frac{1}{KA} = \frac{1}{\alpha_o A_o} + \frac{1}{\alpha_i A_i} + \frac{\delta}{\lambda A_m}$
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:物料衡算,传质速率,传质推动力与阻力,吸收剂三要素	$N_A = K_{ya} \cdot \Delta y_m \cdot V$ $\frac{1}{K_{ya}} = \frac{1}{K_{ya}} + \frac{m}{k_{ia}}$
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:物料衡算与采出率,塔板流体力学,精馏塔效率,精馏塔操作	$N = N_c / \eta$

续 表

单元操作	研究的问题及过程参数	实验参数的关联
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	$H = H_{OE} \cdot N_{OE}$ $H_{OE} = f(v)$
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	$x = x_m \frac{k_L c}{1 + k_L c}$

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,即流体流动阻力测定实验、离心泵特性测定实验、过滤常数测定实验、对流给热系数测定实验、吸收操作及吸收传质系数测定实验、精馏操作及精馏塔效率测定实验、萃取操作及萃取塔传质单元高度测定实验、干燥操作及干燥速率测定实验、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(柏努利)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四类:前 4 个实验强调工程实验方法论的教学,当中 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 至 60 学时,大致可安排 6 到 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高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。

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、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,准确记录实验数据,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。实验考核以考试方式进行,主要是为了检查学生的独立学习情况和对所学知识的掌握程度,学生的实验课成绩按平时占 60%,考试占 40%加权平均总计。

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,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。设备特性参数一般要通过数据的计算整理而得到。

(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严密科学作风,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)至第(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.北京:化学工业出版社,2002
- 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

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 ,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 、管型的粗糙度 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,则实验的次数将达 10^6 之多。这样的实验必是旷时日久,费时费钱。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 不变则往往又是难以做到的。

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。化学工程基础理论在发展过程中,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、黄砂等),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的实际问题中采用的一些实验研究方法,包括:因次论指导下的实验研究方法、数学模型方法、过程分解与合成方法、过程变量分离方法,参数综合方法以及直接实验的方法等。

1.1 因次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。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:

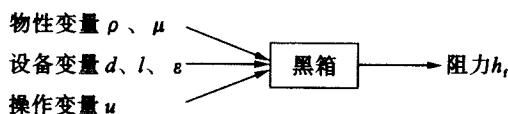


图 1-1 研究湍流流动阻力的“黑箱模型”

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

在“黑箱”方法中,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(无法分别改变 ρ 、 μ)的困难,而因次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些困难,并能达到“由此及彼”、“由小见大”的功效。

1.1.2 因次分析理论

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、时间和质量这三个物理量为基本物理量,其他力学物理量,如速度、压力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) 因次、基本因次、导出因次、无因次准数(无因次数群)

因次(又称量纲,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、时间和质量的因次。

基本因次 基本物理量的因次称为基本因次,力学中习惯上规定 $[L]$ 、 $[T]$ 、 $[M]$ 为三个基本因次。

导出因次 顾名思义,导出物理量的因次称为导出因次,导出因次可根据物理定义或定律由基本因次组合表示,例如:

速度 u , $u = l/t$, 其导出因次为 $[u] = [L]/[T] = [LT^{-1}M^0]$

加速度 a , $a = l/t^2$, 其导出因次为 $[a] = [L]/[T^2] = [LT^{-2}]$

力 F , $F = ma$, 其导出因次为 $[F] = [L]/[T^2] = [MLT^{-2}]$

压力 P 或应力 σ , $\sigma = F/A$, 其导出因次为 $[P] = [MLT^{-2}]/[L^2] = [ML^{-1}T^{-2}]$

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

密度 ρ , $\rho = m/l^3$, 其导出因次为 $[\rho] = [M/L^3] = [ML^{-3}]$

无因次准数 又称无因次数群,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因次的指数均为零,则称该复合物理量为一无因次准数,或称无因次数群。如流体力学中的雷诺数

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

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

1.1.2.2 几个重要的定理

(1) 物理方程的因次一致性定理

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,等式两边的因次也必须一致。此即为物理方程的因次一致性定理或称因次一致性原则。物理方程的因次一致性原则是因次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,其因次为 $[L]$,等式右边的因次为 $[LT^{-1}][T] + [LT^{-2}][T^2] = [L]$,可见,方程两边的因次是一致的。

此外,在化学工程中还广泛应用着一些经验公式,这些公式两边的因次未必一致,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:

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

如若规定了 m 个基本变量, 根据因次一致性原则可将这些物理量组合成 $n - m$ 个无因次准数 $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}$, 则这些物理量之间的函数关系可用如下的 $n - m$ 个无因次准数之间的函数关系来表示:

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

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:

- I) 基本变量的数目要与基本因次的数目相等。
- II) 每一个基本因次必须至少在此 m 个基本变量之一中出现。
- III) 此 m 个基本变量的任何组合均不能构成无因次准数。

(3) 相似定理

- I) 相似的物理现象具有数值相等的相似准数(即无因次准数)。
- II) 任何物理现象的诸变量之间的关系, 均可表示成相似准数之间的函数。
- III) 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准数的数值相等时, 这些现象就相似。

需要说明的是, 相似准数有决定性和非决定性之分, 决定性准数由单值条件所组成, 若准数中含有待求的变量, 则该准数即为非决定性准数。

准数函数最终是何种形式, 因次分析方法无法给出。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, 流体流动阻力的无因次准数关联式的形式为:

$$Eu = C Re^a \left(\frac{l}{d} \right)^b$$

其中 $Eu = \frac{\Delta P}{\rho u^2}$, 称为欧拉准数;

$Re = \frac{du\rho}{\mu}$, 称为雷诺准数或流体运动准数;

$\frac{l}{d}$, 称为几何相似准数。

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