



普通高等教育“十二五”规划教材

化工原理实验

张跃飞 黄灵芝 戴益民 魏超 编



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

化工原理实验

张跃飞 黄灵芝 戴益民 魏超 编



化学工业出版社

北京

本书根据教学改革实践和教学发展需要编写,以处理工程问题的实验研究方法为主线,着重于理论联系实际,重点培养学生的工程观点和工程意识,可以有效地培养学生的创造性思维和动手实践能力。本书共分为15章,分别为绪论、处理工程问题的实验研究方法论、实验误差分析和实验数据的处理、离心泵特性曲线的测定、流体流动阻力的测定、恒压过滤常数的测定、空气-蒸汽对流给热系数测定、筛板精馏塔的操作与塔效率的测定等内容。

本书可作为高等学校化学化工、轻化工程、环境工程、生物工程、制药工程、食品工程等专业的实验教材,也可作为相关领域从事研究、设计与生产的工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验 张跃飞等编. —北京:化学工业出版社, 2014.7
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-20723-4

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 101438 号

责任编辑:靳星瑞
责任校对:陶燕华

装帧设计:张 辉

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 装:三河市万龙印装有限公司
710mm×1000mm 1/16 印张8 字数158千字 2014年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 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:28.00 元

版权所有 违者必究

前 言

化工原理实验是一门技术基础实验课,在培养化工类及相关专业的高级应用型人才中起着举足轻重的作用。化工原理实验属于工程实验范畴,主要研究化工生产过程中的传递过程,所涉及的研究对象是复杂的化工过程实验问题,在处理问题的方法上具有鲜明的工程特点。

化学工程学科在基础理论的长期发展中,已经形成了一系列研究处理工程实际问题的有效方法,如因次分析法、数学模型法等,而这些方法正是化学工程学科基础理论的精华。因此,本书以处理工程实际问题的方法论贯穿全文,重点培养学生的工程观点和工程意识,提高学生分析和解决实际工程问题的能力,培养学生的综合素质。

在本书编写过程中,长沙理工大学化工原理教研室的所有教师均参与了书稿的讨论。第1~5章、第11章、第14章以及第15章由张跃飞编写,第6章和第7章由魏超编写,第8~10章由戴益民编写,第12章和第13章由黄灵芝编写。全书由张跃飞进行统稿和修改。本教材得到了长沙理工大学校级规划教材立项资助(编号:GHJC1307)及湖南省2012年普通高等学校教学改革研究项目(湘教通[2012]401号,化学工程与工艺专业实践教学改革与创新教育研究)资助。

本书在编写过程中,参阅了相关书籍、兄弟院校的教材等大量资料,在此表示感谢。

由于编者的学识水平有限,书中难免存在不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正。

编者

2014年3月

目 录

1 绪论	1
1.1 化工原理实验的特点、重要性及目的	1
1.2 化工原理实验课程的内容	2
1.3 化工原理实验教学方法及基本要求	4
1.4 实验研究报告的编写格式及要求	5
1.5 实验室规则	7
2 处理工程问题的实验研究方法论	8
2.1 直接实验法	8
2.2 因次分析法	9
2.3 数学模型法	13
2.4 过程分解与合成法	18
2.5 过程变量分离法	18
2.6 参数综合法	19
3 实验误差分析和实验数据的处理	21
3.1 实验误差分析的重要性	21
3.2 实验数据的误差与测量值	21
3.3 实验数据的有效数字与记数法	28
3.4 间接测量值的误差传递	30
3.5 回归分析	33
3.6 实验数据处理的重要性及作用	38
3.7 实验数据处理方法	39
4 离心泵特性曲线的测定	44
4.1 实验目的	44
4.2 基本原理	44
4.3 实验装置与流程	46
4.4 实验操作步骤及注意事项	46
4.5 实验数据记录及处理	47
4.6 实验报告及结果分析讨论	48
4.7 思考题	48
5 流体流动阻力的测定	49
5.1 实验目的	49
5.2 基本原理	49

5.3	实验装置与流程	51
5.4	实验操作步骤	52
5.5	实验数据记录与处理	53
5.6	实验报告及结果分析讨论	54
5.7	思考题	54
6	恒压过滤常数的测定	55
6.1	实验目的	55
6.2	实验原理	55
6.3	实验装置和流程	56
6.4	实验操作步骤及注意事项	56
6.5	实验记录及数据整理	57
6.6	实验报告及结果分析讨论	58
6.7	思考题	58
7	空气-蒸汽对流给热系数测定	59
7.1	实验目的	59
7.2	基本原理	59
7.3	实验装置与流程	62
7.4	实验操作步骤与注意事项	62
7.5	实验数据记录与处理	64
7.6	实验报告及结果分析讨论	65
7.7	思考题	65
8	筛板精馏塔的操作与塔效率的测定	66
8.1	实验目的	66
8.2	基本原理	66
8.3	精馏装置及流程	68
8.4	实验操作步骤与注意事项	68
8.5	实验记录及数据处理	70
8.6	实验报告及结果分析讨论	71
8.7	思考题	71
9	填料吸收塔的操作及吸收传质系数的测定——水吸收氨	73
9.1	实验目的	73
9.2	基本原理	73
9.3	实验装置及流程	75
9.4	实验操作步骤	76
9.5	实验数据记录及处理	78
9.6	实验报告及结果分析讨论	80
9.7	思考题	80

10 填料吸收塔的操作及吸收传质系数的测定——水吸收二氧化碳	81
10.1 实验目的	81
10.2 基本原理	81
10.3 实验装置	82
10.4 实验步骤与注意事项	83
10.5 实验数据记录及处理	84
10.6 实验报告及结果分析讨论	85
10.7 思考题	85
11 液-液萃取操作实验	86
11.1 实验目的	86
11.2 实验原理	86
11.3 实验装置	90
11.4 实验方法、步骤及注意事项	91
11.5 实验数据记录及处理	92
11.6 实验报告及结果分析讨论	93
11.7 思考题	93
12 干燥操作和干燥速率曲线的测定	94
12.1 实验目的	94
12.2 基本原理	94
12.3 实验装置	97
12.4 实验操作步骤与注意事项	98
12.5 实验报告及结果分析讨论	98
12.6 思考题	98
13 流化床连续干燥操作实验	99
13.1 实验目的	99
13.2 实验原理	99
13.3 实验装置及流程	101
13.4 实验方法及步骤	102
13.5 实验数据及数据处理	103
13.6 实验注意事项	105
13.7 思考题	106
14 机械能转化演示实验	107
14.1 实验目的	107
14.2 基本原理	107
14.3 实验装置流程	109
14.4 演示操作	110
14.5 注意事项	110

14.6	数据分析	110
15	雷诺演示实验	112
15.1	实验目的	112
15.2	基本原理	112
15.3	实验装置及流程	113
15.4	演示操作	113
附录		115
附录一	常压下乙醇-水的汽-液平衡数据	115
附录二	氨在水中的亨利系数	115
附录三	乙醇-水溶液的密度/(kg/L)	115
参考文献		120

1 绪 论

1.1 化工原理实验的特点、重要性及目的

化工原理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。与前置课程实验所不同的是,该课程具有工程的特点,每个单元操作实验就相当于化工生产中的一个基本过程,通过它能建立起一定的工程概念。该课程强调实践性和工程观念,并将能力和素质培养贯穿于实验课的全过程。可以从实验过程中更有效地学到更多工程实验方面的原理及测试手段;可以发现复杂的真实设备与工艺过程同描述这一个过程的数学模型之间的关系;也可以认识到对于一个看似复杂的过程,一经了解,可以只用最基本的原理解释和描述。因此,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。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。正是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。

化工原理实验课程的首要目的就是要培养学生能找出工程实际问题的主要实质,提出问题并解决之。为了养成科技工作者的这种必备素质和工程观点,应该经常提出如下一类的问题并试图回答:这套设备或工艺过程的最关键的特征是什么?包含的基本原理?能否找出操作的平衡状态、稳定状态和过渡状态?如何达到这些状态及如何操作?独立变量有哪些?如何测量和控制它们?仪器检测范围?是否可用其他方式来测量和控制这些独立变量?相关参数有哪些?如何测量?误差产生的原因?误差有多大?如何控制或减少误差?装置中测量出的参数的真实意义?装置或过程为什么如此设计?如要达到此实验目的是否有其他途径?在设备中完成指定的工艺要求,最佳设计如何?

化工原理实验课程不仅帮助学生们养成用头脑思考的习惯，而且还培养学生掌握实验技能来解决问题，要特别注意以下几个方面！

① 认真理解实验目的，学会根据实验目的设计装置来测量所需数据。

② 深入了解测量参量的物理意义，包括定义，测量时的系统误差、精度和准确性。

③ 养成仔细观察并记录真实实验数据的习惯，并示以草图。

④ 熟悉几种在化工生产中常用的基本设备、常用仪器和测量方法。

⑤ 培养组织能力、责任心、创造性和合作精神。

⑥ 培养撰写工程实验报告的能力，仔细描写重要的及有意义的现象和结果。

⑦ 培养科学的思维方法、严谨的科学态度和科学作风。

1.2 化工原理实验课程的内容

一个化工过程往往有很多单元过程和设备所组成。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和操作参数的可靠性，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设备制造商所提供的说明书中获取。但还有许多重要的工艺参数，不能够由文献查取，或文献中虽有记录，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的影响，了解单元设备的操作特性，不仅十分重要，而且也是十分必要的。

表 1-1 中归纳了化工原理实验课程中对于化工生产应用较为普遍的化工单元操作的研究内容。

表 1-1 化工原理实验中研究的化工单元过程问题及过程参数

单元操作名称	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：因次分析法 工程知识点：流体阻力、机械能衡算	$\lambda = f\left(Re, \frac{\epsilon}{d}\right)$ $h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2}$
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：直接实验法、过程分解法 工程知识点：离心泵特性、机械能衡算、离心泵工作点、离心泵的流量调节	$H = f_1(Q)$ $N = f_2(Q)$ $\eta = f_3(Q)$

续表

单元操作名称	研究的问题及过程参数	实验参数的关联
过滤	研究的问题:过滤速率、过滤介质 过程参数:过滤速率常数 工程方法:数学模型法、参数综合法 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:因次分析法、过程分解与合成法 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:过程分解与合成法、变量分离法、参数综合法 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、回流比、灵敏板温度、塔釜压力 工程方法:变量分离法 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	$H = H_{OE} N_{OE}$ $H_{OE} = f(\nu)$
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	$t = f_1(\tau), c = f_2(\tau)$ $dN/d\tau = f_3(\tau)$

为了适应不同层次、不同专业的教学要求,本教材共编写了9个典型的化工单元操作实验,包括离心泵特性曲线的测定实验、流体流动阻力的测定实验、恒压过滤常数的测定实验、空气-蒸汽对流给热系数测定实验、筛板精馏塔的操作与塔效率的测定实验、填料吸收塔的操作及吸收传质系数的测定实验(包括水吸收氨以及水吸收二氧化碳两种流程)、液-液萃取操作实验、干燥操作和干燥速率曲线的测定实验、流化床连续干燥操作实验,以及雷诺演示实验、机械能转化演示实验两个经典的演示实验。

按照原教育部化工原理教学指导委员会的建议,化工原理实验课时约为30~60学时,大致可安排4~8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。

1.3 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和判断能力; 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。

1.3.1 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所组成, 主要包括实验预习课、撰写预习报告、预习情况考查(实验前提问)、实验操作、撰写实验报告、实验考核。实验预习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在预习阶段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, 并在实验结束后对实验数据进行准确的处理, 检查核对实验结果。实验研究报告应独立完成, 并按标准的实验报告格式撰写。实验考核主要是考查学生数据处理的正确性和合理性, 并检查学生对课后思考题的回答准确程度, 从而检查学生的独立学习情况和对所学知识的掌握程度。

1.3.2 化工原理实验教学的基本要求

(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行之有效。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、黏度等)、操作参数(如温度、压力、流量等)、设备结构参数(如管径、管长等)和设备特性参数(如阻力系数、传质系数、传热系数、功率等)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。实验过程中,要认真按实验步骤精心操作,随时注意观察现象。注意发现问题。对精密测试仪器,一定要按操作规程操作。记录数据要精确,随时判断所测数据的合理性。出现问题时,应找出原因,重复测试,不能有任何草率,不认真的学习态度。

(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(如温度、压力、流量等)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

实验记录的数据是处理实验结果的依据。因此,实验数据的记录要求清晰、准确。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。在实验记录过程中通常应注意如下要求:

① 事先必须拟好记录表格,不许随便使用白纸代替,以免所记录数据混淆不清。

② 实验时一定要在操作稳定后再读数据,操作条件改变后,再待稳定后开始下一步实验。每个实验测定以后,应重复读一次,避免发生错误。

③ 所记录数据应是直接读出的参考值,不是经过运算后的数据。

④ 记录数据时,应注意所测数据的单位。

⑤ 数据记录必须真实反映仪表的精确度,一般要记录至仪表上最小分度以下的一位数。

1.4 实验研究报告的编写格式及要求

实验完成后,必须以严格的科学态度,按指导书、任务书的不同要求认真写好实验报告。实验报告应简明扼要、一目了然,数据完整,交代清楚,结论明确,有讨论、有分析、得出的图线或公式有确定的适用条件。一般来说,化工原理实验报告应包括下述基本内容:

① 封面:实验任务名称,报告人姓名、学号、专业,同组人姓名,实验地点,

指导教师, 实验日期等。

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 实验基本原理(实验的理论依据): 简要说明实验所依据的基本原理, 包括实验所涉及的主要概念, 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 实验装置及流程示意图: 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、仪表的名称。标出设备、仪器仪表及调节阀等的编号, 在流程图的下方写出图名及编号所对应的设备、仪器等的名称。

⑤ 实验步骤与注意事项: 根据实际操作程序划分为几个步骤, 并在前面加上序数词, 以使条理更为清晰。对于操作过程的说明应简单、明了。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。

⑥ 原始数据记录表格: 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的有效数字的位数。

⑦ 实验数据处理结果: 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进行整理、计算, 并将其制成便于分析讨论的表和图。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。

⑧ 数据处理计算过程举例: 选取其中一组数据, 列出详细的数据处理过程, 以说明数据处理的具体方法。

⑨ 实验结果分析与讨论, 主要包括: (a) 从理论上对实验所得结果进行分析和解释, 说明其必然性; (b) 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; 分析误差的大小和原因, 指出改善实验结果的途径; (c) 将实验结果与前人或他人的结果对比, 说明结果的异同, 并解释这种异同; (d) 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; 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。

⑩ 思考题。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编写。第一部分为预习报告, 包括上述内容中的第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。另外, 在实验报告的封面应注明本人及同组人的姓名、指导老师的姓名。

要强调的是, 学生在编写实验数据处理部分内容时, 除了把所有的计算结果全部列出以外, 必须提供一组结果的具体手算过程(计算示例)。

1.5 实验室规则

(1) 实验前应仔细阅读实验讲义,了解实验目的、方法、操作、注意事项,经过充分的准备方能参加实验,以保证实验任务的圆满完成。没有经过准备的同学不准参加当天实验。

(2) 实验人员应端正实验态度,明确实验目的,认真参加实验。实验是理论联系实际,巩固课堂理论,提高动手能力的重要环节。

(3) 准时进入实验室。严肃认真地进行实验。室内不准吸烟,不准大声喧哗和追逐嬉戏。未经允许,不准随便离开实验室。

(4) 学生分组进行实验,必须分工协助,认真操作,认真观察和记录数据,集中精力,争取按时完成规定的实验。

(5) 注意安全:启动离心泵马达时,防止头发和衣服角卷进去!注意别让高压蒸汽烫伤!不许用手去摸电源开关,不许用手直接接触带电设备!

(6) 实验结束后,应将使用仪器设备整理复原。将现场打扫干净。

2 处理工程问题的实验研究方法论

2.1 直接实验法

直接实验法是一种解决工程实际问题的最基本方法。它可以对特定的工程问题直接进行实验测定,所得到的结果较为可靠。但是在直接实验法中,往往只能用到条件相同的情况,因此具有较大的局限性。

对一个多变量影响的工程问题,若采用直接实验法,通常是先只改变其中某一变量而将其他变量固定进行实验,然后再改变另一变量而将其他变量固定,依次类推,逐个地研究各变量的影响。但是,如果变量数较多,采用直接实验法则会使实验次数剧增。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 , 则所需的实验次数为:

$$i = m^n \quad (2-1)$$

以流体流动阻力实验为例,影响流体阻力 ΔP 的主要因素有流体的密度 ρ 、黏度 μ 、管道直径 d 、管道长度 l 、管壁粗糙度 ϵ 及流速 u , 变量数为 6 个, 则有:

$$\Delta P = f(u, d, l, \epsilon, \rho, \mu) \quad (2-2)$$

如果按一般的网格法组织实验,若每个变量改变条件次数为 10 次,则需要做 10^6 次实验。这样的实验必将是费时费钱的。例如,为改变 ρ 、 μ 则必须选用多种流体物料,为改变 d 、 l 、 ϵ 则必须建设不同的实验装置。此外,为考察 ρ 的影响而保持 μ 不变往往又是难以做到的。不难看出,变量数出现在幂上,涉及变量越多,所需实验次数将会剧增。另外,如前所述,对化工工程问题进行实验研究的困难在于所涉及的物料千变万化,设备形状尺寸差别悬殊,变量数量众多,如果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,则所需的实验工作量和实验难度是实验人员难以承受的。

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。化学工程技术理论在发展过程中,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作用,分别是能够“由此及彼”和可以“由小见大”,即借助于模拟物料(如空气、水等),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的“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。

本章将介绍处理化工过程的实际问题中所采用的一些实验研究方法, 这些方法主要包括: 因次分析法、数学模型法、过程分解与合成法、过程变量分离法以及参数综合法。这里重点介绍应用较多的因次分析法和数学模型法。

2.2 因次分析法

2.2.1 因次分析法所依据的基本理论

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联式。

2.2.1.1 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, 其他力学物理量如压力、速度等可以通过相应的物理定义或定律导出, 则把这些物理量称为导出物理量。

(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)是物理量的表示符号, 如以 $[L]$ 、 $[T]$ 和 $[M]$ 分别表示长度、时间和质量, 则 $[L]$ 、 $[T]$ 和 $[M]$ 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, 力学中习惯把 $[L]$ 、 $[T]$ 和 $[M]$ 规定为三个基本因次。它们是相互独立的, 不能彼此导出。

导出因次: 由基本因次导出, 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, 在力学领域, 除了 $[L]$ 、 $[T]$ 和 $[M]$ 以外, 其他力学物理量的因次都可以由这三个因次导出, 并可写成幂指数乘积的形式。

$$[Q] = [M^a L^b T^c] \quad (2-3)$$

式中, a 、 b 和 c 为常数。

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 $[F] = [M][L]/[T^2] = [MLT^{-2}]$

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

黏度 μ , $\mu = \tau \frac{du}{dR}$, 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, 则成该复合物理量为一无因次准数。如流体流动过程中用来判断流动形态的雷诺数: