



普通高等教育“十二五”规划教材

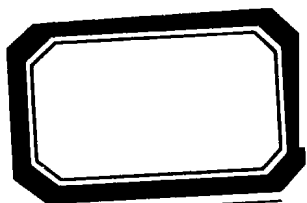


石油化学工程 基础实验指导

孙 亮 马占华 王万里 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)



普通高等教育“十二五”规划教材

石油化学工程 基础实验指导

孙 亮 马占华 王万里 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书旨在介绍石油化学工程基础实验研究全过程所涉及的基本问题,内容包括工程问题的实验研究方法、实验规划和流程设计、化工测量技术及常用仪表、化工原理基础实验技术和计算机数据处理等方面的内容。

本书以处理工程问题的实验研究方法为主线,注重系统性和实用性,着重于理论联系实际,强调研究方法和工程意识的培养,并将现代化工研究的新技术、新方法引入教材,实用与理论兼顾,以期拓宽学生视野、增强创新意识。

本书不仅可以作为高等院校、高职院校化工类专业的实验教材,亦可作为化工、材料、环境、生物工程、医药、机械及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

石油化学工程基础实验指导 / 孙亮, 马占华, 王万里
主编. —北京: 中国石化出版社, 2012. 7
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 5114 - 1503 - 5

I. ①石… II. ①孙… ②马… ③王… III. ①石油化工 - 化学工程 - 实验 - 高等学校 - 教材 IV. ①TE65 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 140307 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

河北天普润印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 12.25 印张 307 千字

2012 年 7 月第 1 版 2012 年 7 月第 1 次印刷

定价:30.00 元

前 言

化学工程学是建立在实验基础上的科学，它不仅有完整的理论体系，而且具有一些独特的实验研究方法，是化工及相关专业学生必修的一门重要技术基础课。石油化学工程基础实验是在石油化学工程的基础上，由化工原理实验发展演变而成的。其教学目的是使学生加深理解和巩固化工单元操作的基本原理，熟悉和掌握各单元操作设备的工作原理、特性及使用方法，熟悉和掌握常见的化工仪表(如温度计、压力表或压差表、流量计等)的工作原理和使用方法。在实验中培养学生分析和解决化工过程中实际工程问题的能力，加强学生的动手能力，培养和提高学生的实验研究能力。

本书是《化学工程基础》、《化工原理》及其相关课程的配套教材，内容包括化学工程基础实验相关理论知识、化学工程基础实验、演示实验及数据的计算机处理，其中实验部分重点介绍了流体流动阻力的测定实验、流量计校核实验、离心泵性能参数的测定、恒压过滤常数的测定、固体流态化实验、套管换热器传热系数的测定、吸收传质系数的测定实验、筛板精馏塔全塔效率的测定实验、液-液萃取实验、干燥速率曲线的测定等10个实验项目的实验原理、流程及相关的实验操作方法。

本书从大量的实际生产操作经验及实验教学经验出发，重点阐述了实验操作基本技能、实验注意事项及安全基本知识等内容，以注重培养学生的工程意识以及提出、分析、解决问题的能力。

本教材之成书，皆赖于中国石油大学化工原理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。为避免繁冗，除必要的参考书目在书末列出外，国内出版的同类教材不再列出，在此一并表示感谢。

由于编著水平有限，书中难免存在不妥之处，希望专家、读者提出宝贵意见，以助修正。

目 录

| | |
|------------------------------|--------|
| 0 绪 论 | (1) |
| 0.1 课程的特点和重要性 | (1) |
| 0.2 课程的研究内容 | (1) |
| 0.3 课程的教学目的、方法及基本要求 | (2) |
| 0.4 实验研究报告的撰写格式及要求 | (4) |
| 0.5 实验室的安全 | (4) |
| 1 工程问题的实验研究方法 | (8) |
| 1.1 因次论指导下的实验研究方法 | (8) |
| 1.2 数学模型方法 | (12) |
| 1.3 过程分解与合成方法 | (13) |
| 1.4 过程变量分离方法 | (14) |
| 1.5 参数综合方法 | (14) |
| 2 实验规划和流程设计 | (15) |
| 2.1 实验规划的重要性 | (15) |
| 2.2 实验范围与实验布点 | (16) |
| 2.3 实验规划方法 | (16) |
| 2.4 实验流程设计 | (18) |
| 3 实验误差分析及实验数据处理 | (20) |
| 3.1 实验误差分析的重要性 | (20) |
| 3.2 误差的表示方法 | (23) |
| 3.3 误差的基本性质 | (25) |
| 3.4 实验数据的有效数字与计数法 | (30) |
| 3.5 实验数据的处理 | (32) |
| 3.6 异常值及其剔除 | (40) |
| 3.7 实验数据的回归分析与曲线拟合 | (44) |
| 4 化工测量技术及常用仪表 | (55) |
| 4.1 概述 | (55) |
| 4.2 流体压强的测量方法 | (55) |
| 4.3 流体流量的测量方法 | (61) |
| 4.4 流体温度的测量方法 | (67) |
| 4.5 物流组成的分析方法 | (71) |
| 5 化学工程基础实验 | (87) |
| 5.1 流体流动阻力的测定实验 | (87) |
| 5.2 流量计校核实验 | (93) |

| | | |
|------|--------------------------|-------|
| 5.3 | 离心泵性能参数的测定 | (98) |
| 5.4 | 恒压过滤常数的测定 | (102) |
| 5.5 | 固体流态化实验 | (107) |
| 5.6 | 套管换热器传热系数的测定 | (111) |
| 5.7 | 吸收传质系数的测定实验 | (117) |
| 5.8 | 筛板精馏塔全塔效率的测定实验 | (123) |
| 5.9 | 液-液萃取实验 | (131) |
| 5.10 | 干燥速率曲线的测定 | (138) |
| 6 | 化学工程基础综合实验 | (144) |
| 6.1 | 流体流动过程综合实验 | (144) |
| 6.2 | 正交试验法在过滤实验中的应用 | (145) |
| 6.3 | 传热综合实验 | (147) |
| 6.4 | 精密精馏综合实验 | (150) |
| 6.5 | 精馏操作型实验 | (154) |
| 7 | 化学工程基础演示实验 | (155) |
| 7.1 | 流体流动型态的演示 | (155) |
| 7.2 | 机械能的相互转化 | (158) |
| 8 | 计算机数据处理 | (161) |
| 8.1 | Excel 在化学工程基础实验数据处理中的应用 | (161) |
| 8.2 | Origin 在化学工程基础实验数据处理中的应用 | (166) |
| 8.3 | Matlab 在化学工程基础实验数据处理中的应用 | (170) |
| 附录 1 | 实验报告的书写 | (180) |
| 附录 2 | 化学工程基础实验中常用单位及其换算 | (181) |
| 附录 3 | 空气的重要物理性质 | (183) |
| 附录 4 | 水的重要物理性质 | (183) |
| 附录 5 | 乙醇-水气液相平衡数据 | (184) |
| 附录 6 | 乙醇-水溶液的密度 | (185) |
| 附录 7 | 乙醇-水溶液浓度与折射率的关系 | (188) |
| 附录 8 | 二氧化碳在水中的亨利系数 | (189) |
| 附录 9 | 二氧化碳密度 | (189) |
| 参考文献 | | (190) |

0 绪 论

0.1 课程的特点和重要性

化工工程基础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。化学工程基础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，较多的是以理想化的简单的过程或模型作为研究对象，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，对于化学工程问题而言，由于被加工的物料千差万别，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。化学工程基础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。

化学工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，化学工程基础实验在化工原理教学过程中占有不可替代的重要地位。

0.2 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，化学工程师必须准确了解并把握设备的特性，必须掌握正确判断有关设计或操作参数的可靠性的方法。由于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，但由于操作条件的限制，这些参数的可靠性难以确定；而且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。

为了适应不同层次、不同专业的教学要求，本教材将化学工程基础实验分成基础实验、综合实验和演示实验三部分。其中基础实验部分介绍了典型的化工单元操作实验，即流体力学

动阻力测定实验、离心泵特性测定实验、流量计流量校正实验、过滤常数测定实验、固体流态化实验、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、液-液萃取实验和干燥实验等内容。同时为了培养学生的实验技能和科学研究能力，本书对化工过程技术与设备、实验方法学、现代测控原理等理论知识也略有介绍，以期使学生在完成化学工程基础实验的同时，对先进的测量手段、计算机控制技术及应用在化学工程领域中的应用等方面也有所了解。

0.3 课程的教学目的、方法及基本要求

21 世纪科学技术的迅猛发展，对高等学校人才的培养提出了新的要求。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 化学工程基础实验的教学目的

本课程是化学工程教学的重要组成部分。它是用自然科学的原理考查、解释和处理工程实际问题，其研究方法主要是理论解析和理论指导下的实验研究。课程强调工程观点，定量运算和设计能力的训练，着重培养学生运用化学工程和有关先修课程所学知识处理工程问题的综合能力，同时培养学生实事求是、严肃认真的工作态度和团结协作的工作作风。化学工程基础实验的教学目的主要有以下几个方面：

(1) 培养学生从事实验研究的初步能力。在科学实践过程中，从事实验研究应该具备如下能力：一是对实验现象具有敏锐的观察能力；二是运用各种实验手段正确地获得所需的实验数据；三是分析和归纳实验数据并得出合理的结论。这些能力正是创新型人才必须具备的基本素质。

(2) 初步掌握有关化学工程的实验研究方法和实验技术技能。主要包括两个方面：一是以数学模型法和因次分析法为指导的实验研究方法，灵活应用这些方法研究和处理各种化工工程问题；二是分析和解决化工工程问题的综合能力的培养，包括统筹合理地规划实验的能力、正确选择设备和设计流程的能力、正确选择和使用工程测试仪表的能力等。

(3) 培养学生在学习理论课程的基础上，加深对主要原理、方法和重要概念的理解，并能灵活应用这些概念对实验结果进行正确分析、讨论和总结，以及用简明的文字和适当的图表撰写实验研究报告的能力。

各专业的化学工程基础实验在实际操作时因受各种条件的制约，一般来说学生只能在已有的实验装置和规定的实验条件范围内进行，所以，上述能力的培养只能是初步的，若想取得更好的效果，则实验应由学生从确定课题、设计实验内容、安装实验装置等做起。即便如此，化学工程基础实验所包含的内容，也远不是科学研究方法的全部，也达不到实验研究能

力的全面训练，只能是为以后从事科学实验打下良好的基础。

0.3.2 化学工程基础实验课程的教学环节

化学工程基础实验是由若干教学环节组成，即实验理论课(即实验预习课)、撰写预习报告、实验前提问、实验操作、撰写实验研究报告等。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一环，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。

0.3.3 化学工程基础实验的教学基本要求

(1) 掌握处理工程问题的实验研究方法

化学工程基础实验中始终贯穿着“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

化学工程基础实验的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) 严肃认真准确地记录原始数据，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 实验研究报告的撰写格式及要求

化学工程基础实验的实验报告应包括下述基本内容：实验内容、实验目的、实验基本原理、实验(设计)方案、实验装置及流程图、原始数据记录、实验数据处理结果、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，第一部分为实验预习，第二部分为实验数据的记录与处理。具体要求如下：

0.4.1 实验预习

认真预习实验是做好实验的前提，所以要充分预习，并按下述要求完成实验预习报告。

(1) 认真阅读实验指导教材，明确实验的目的、原理及注意事项。

(2) 根据实验的具体任务，明确实验的内容和步骤分析，应测定哪些数据，并估计实验数据在测量范围内的变化规律。

(3) 在实验现场结合实验指导教材，仔细观查设备流程、主要设备的构造及仪表的种类，了解设备的开启方法及设备的操作注意事项。

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。

0.4.2 实验数据的记录

此步骤是在预习报告的基础上，将实验中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。需要强调的是，学生在撰写实验数据处理部分内容时，除了要将计算结果全部附上外，还应有一组手算的计算过程示例。具体要求如下：

(1) 按原始实验数据记录表的要求，记录测定的各项实验数据，并记录实验条件。实验条件一般包括环境条件、仪器设备和药品条件，前者如室温、大气压、湿度等，后者包括使用仪器设备的名称、规格、型号、实验精度以及药品的名称、纯度等。

(2) 必须在实验数据稳定后读数，当实验条件改变后，也应等待一定时间后再读取数据，以排除在管路系统中含有气泡或仪表滞后等引起的读数不准情况发生。

(3) 记录实验数据必须准确、可靠，严禁随意涂抹数据，在相同的实验条件下，至少应读取两次数据，而且只有在两次读数相近的情况下才可改变实验条件，进行下一步操作。

(4) 数据记录必须真实地反映仪表的精度，一般要记录至仪表最小分度下一位数。

(5) 实验中若出现异常情况或数据有明显误差时，应在备注栏中加以注明。

实验报告的具体书写格式，可参见附录1。

0.5 实验室的安全

化学工程基础实验是一门基于实践的技术基础课程，与基础化学实验有所不同，每一个实验都相当于一个小型单元的生产流程，电器、仪表及机械传动设备等组合为一体，有些实验过程还要在高压、高温、低温或高真空条件下操作，要特别注意实验设备及仪表的安全使

用, 因此在进行实验操作之前必须掌握实验室在防火、用电、高压钢瓶及化学药品使用等方面的安全知识。

0.5.1 防火安全

化工实验室发生火灾的隐患主要包括易燃化学品、电器设备及加热系统等, 在实验操作过程中首先要避免火灾的发生, 如在实验室不要存放过多的易燃品, 用后及时回收、处理。在实验前要检查电器设备, 对已经老化的线路要及时更换。另外必须要熟悉消防器材的使用方法。一旦发生火情, 应该冷静判断情况, 采取有效的措施, 迅速找来灭火器或消防水龙头等进行灭火, 并尽快报警。

0.5.2 用电安全

(1) 电对人体的危害

电对人体的伤害可分为外伤(如电灼伤)和内伤(电击)两种情况。其中造成电击的触电主要有单相触电和两相触电两种情况。单相触电是最容易发生的触电事故, 是指人体接触到一相带电体的触电; 两相触电是指人体同时接触到两相带电体的触电, 此时, 人体处于线电压 380V 之下, 是最危险的。人体触电危险的程度主要与电流大小、电流作用于人体的时间和人体电阻的大小有关(因各人的身体状况不同, 其触电危险的程度也不一样)。通常把 10mA 以下的交流电或 50mA 以下的直流电通过人体视为安全电流, 人接触这种电流时可自动摆脱电源。电流作用于人体的时间越长, 由于人体出汗发热等原因, 人体电阻就会下降, 这时电的危害就越大。

(2) 电源的使用与安全

实验室一般提供有 220V 和 380V 的交流电源以及直流电源, 使用时应根据实验需要和电器所需电源电压来接插不同的电源。220V 电源是一种单相电源, 在实验室中最常见, 其插座有两孔和三孔两种, 接线时应注意按左零右火的原则布置线路。380V 的电源也称为动力电源, 采用三相供电制, 是实验室用电中最危险的部分, 除了一根地线外, 其余三根均为火线。使用时应加装铁盒闸刀开关或空气断路器, 并采取保护性接地措施, 使漏电设备的对地电位降到 40V 以内的安全限度。

使用电器时应注意其额定电压和功率, 电器线路应有良好的绝缘性, 注意防潮, 不带电操作。电源发生火灾时, 首先要切断电源。在火灾的初期可用干毛巾捂灭明火, 灭火器宜用四氯化碳灭火器、二氧化碳灭火器和干粉灭火器灭火。使用灭火器时要先去掉保险销, 并对准火的根部, 按下手柄。

为保证用电安全, 应注意以下事项:

- ① 实验前须了解室内总电闸及分电闸的位置, 便于出现用电事故时及时切断电源。
- ② 接触或操作电器设备时, 手必须干燥。不能用试电笔去试高压电。
- ③ 导线的接头应紧密牢固, 裸露的部分必须用绝缘胶布包好或塑料管套好; 接头损坏或绝缘不良时应及时更换。进行上述操作或电器设备维修时必须停电作业。
- ④ 电源或电器设备上的保护熔断丝(或保险管)都应该在额定电流标准内使用, 不能任意加大, 更不能用铜丝或铝丝替代。所有电器设备的金属外壳应有接地线, 并定期检查是否连接良好。
- ⑤ 启动电动机时, 应先用手转动一下电机的轴, 接通电源后, 立即查看电机是否已转

动；若不转动，应立即切断电源，否则电机很容易烧毁。若电源开关是三相刀闸，合闸时一定要快速地合到底，否则容易发生“跑单项”，即三相中有一相实际上未接通。这样电机极易被烧毁。

⑥ 若用电设备是电热器，在通电之前，一定要搞清楚进行电加热所需要的前提条件是否已经具备。比如在精馏实验中，在接通塔釜电热器之前，必须清楚釜内液面是否符合要求，塔顶冷凝器的冷却水是否已经打开等。

⑦ 在电源开关与用电器之间若有电压或电流调节器时，在接通电源开关前，一定要将电压或电流调节器置于“零位”状态，以保护用电器不被损坏。

0.5.3 高压气瓶的安全使用

实验室使用的很多气体是由工厂生产后，贮存在气体钢瓶里备用。为了便于从钢瓶的外观对气体进行区别，国家制定有统一的规定，表0-1列举了我国部分气体钢瓶的色标。

表0-1 我国部分气体钢瓶的颜色标志

| 充装气体名称 | 化学式 | 瓶色 | 字样 | 字色 | 色环 | |
|--------|---|-------|--------|----------|-----|---|
| 氧 | O ₂ | 淡(酞)兰 | 氧 | 黑 | 白色 | |
| 氢 | H ₂ | 淡绿 | 氢 | 大红 | 淡黄色 | |
| 氮 | N ₂ | 黑 | 氮 | 淡黄 | 白色 | |
| 空气 | — | 黑 | 空气 | 白 | 白色 | |
| 氨 | NH ₃ | 淡黄 | 液氨 | 黑 | — | |
| 二氧化碳 | CO ₂ | 铝白 | 液化二氧化碳 | 黑 | 黑色 | |
| 乙炔 | CH≡CH | 白 | 乙炔不可近火 | 大红 | — | |
| 丙烷 | CH ₃ CH ₂ CH ₃ | 棕 | 液化丙烷 | 白 | — | |
| 氩 | Ar | 银灰 | 氩 | 深绿 | 白色 | |
| 液化石油气 | 工业 | — | 棕 | 石油液化气 | 白 | — |
| | 民用 | — | 银灰 | 家用燃料 LPG | 大红 | — |

氢气、氧气、氮气和空气等气体在钢瓶中呈压缩气状态，二氧化碳、氨气等在钢瓶中呈液化状态，乙炔是一种特种气体，乙炔瓶内装有多孔性物质(如木屑或活性炭)和丙酮，乙炔气体在高压下溶于含有丙酮的多孔性物质中。钢瓶的色环与钢瓶内的压力有关，一般来说钢瓶内压力等于15MPa时不加环，压力为20MPa时加一道环，压力为30MPa时加二道环。

气体钢瓶是由无缝碳素钢或合金钢制成的，通常适用于装介质压力在15MPa以下的气体，使用气瓶的主要危险是气瓶可能爆炸和漏气。已充气的气体钢瓶爆炸的主要原因是气瓶受热而使其内部气体膨胀，以致压力超过气瓶的最大负荷而爆炸。另外，可燃性气体的漏气也会造成危险，如氢气泄露时，与空气混合后体积分数达到4.0%~75.2%时，遇明火就会发生爆炸。因而在使用高压钢瓶时要注意以下事项：

(1) 搬运钢瓶时，应检查钢瓶帽和橡胶安全圈是否齐全，并严防钢瓶摔倒或受到撞击，以免发生意外事故。钢瓶应远离热源，放在阴凉、干燥的地方。使用时，必须牢固地固定在架子上、墙上或实验台旁，离火源不得少于5m。乙炔瓶使用时不应倒放，且在使用中受热有聚合爆炸的危险，如有发热应立即停用，采用水冷降温。

(2) 严禁油或其他易燃性有机物玷污在气瓶上，特别是出口和气压表处；在使用助燃、

可燃或自燃气体时，其送气管道也应避免被油脂污染。气瓶若发生泄漏，也不可用棉、麻等堵漏，以防燃烧引起事故。氧气瓶漏气时，不能用肥皂液试漏，也不能与乙炔瓶同时使用。

(3) 使用钢瓶时，一定要用气压表，而且各种气压表不能混用。一般可燃性气体的钢瓶螺纹是左旋螺纹(如氢气瓶、乙烯气瓶等)，不可燃或助燃性气体的钢瓶气门螺纹是右旋螺纹(如氮气瓶、氧气瓶等)。

(4) 使用钢瓶时必须连接减压阀或高压调节阀，不经这些部件让系统直接跟钢瓶连接是非常危险的。不同气体的钢瓶配有不同的减压阀，专用减压阀的颜色与钢瓶的颜色一致。减压阀一般来说不能混用，但氧气减压阀可用于氮气和压缩空气的减压，而氮气减压阀只有在充分洗除油脂后，才能用于氧气的减压。

(5) 开启钢瓶阀门及调压时，人不要站在气体出口的前方，头不要在瓶口上方，以防钢瓶的总阀门或气压表被冲出伤人。使用减压阀时应先开钢瓶的顶阀，再开减压阀，用完后，先关闭顶阀，待低压指示回零时，再关闭减压阀。

(6) 当钢瓶使用到瓶内压力为 0.5MPa 时，应停止使用。压力过低会给重新充气带来不安全因素，当钢瓶内的压力与外界压力相同时，会引起空气的进入。

0.5.4 汞的安全使用

汞蒸气的最大安全浓度为 $0.01\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，在 20°C 时汞的饱和蒸气压为 0.2MPa，比安全浓度大 100 多倍。若在一个不通风的房间内，汞直接暴露于空气中，就有可能使空气中汞蒸气超过安全浓度，所以必须严格遵守以下有关安全用汞的操作规定：

(1) 汞不能直接暴露于空气中，因此在容器内汞的上面应用水或其他液体覆盖，然后再给容器加盖。

(2) 取汞时，一定要缓慢倾斜倒出，以免溅出，并在浅搪瓷盘内进行。

(3) 实验操作前应检查用汞仪器安放处或仪器连接处是否牢固，及时更换已老化的橡皮管。橡皮管或塑料管的连接处一律用金属束缚牢，以免在实验时脱落使汞流出。

(4) 当有汞散落在地上、桌上或水槽等处时，应尽可能地用吸汞管将汞珠收集起来，再用金属片(如锌、铜)在汞溅落处多次刮扫；最后用硫磺粉覆盖在有汞溅落的地方，并磨擦之，使汞变为硫化汞，也可用高锰酸钾溶液使汞氧化。擦过汞的滤纸或布块必须放在有水的陶瓷缸内，统一处理。

(5) 装有汞的仪器应避免受热，保存汞的地方应远离热源。严禁将有汞的器具放入烘箱。

(6) 用汞的实验室要有良好的通风设备，并与其他实验室分开，经常通风排气。

有关玻璃仪器及化学药品的安全使用在有关先修课程的实验里已有介绍，此处不再赘述。

1 工程问题的实验研究方法

由于化工工程问题实验研究的困难在于所涉及的物料组成、性质及其状态千变万化，设备形状尺寸相差悬殊，因此变量数量众多，如采用通常的实验研究方法，必须遍历所有的物料和一切可能的设备几何尺寸，其所需的实验工作量和实验难度是人们难以承受的。一般来说，若一个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：

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

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 、管型的粗糙度 ε 、流速 u 等 6 个变量，即

$$h_f = f(u, d, l, \varepsilon, \rho, \mu) \quad (1-2)$$

如果按照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。这样的实验无论是在时间上还是物质消耗上都是无法接受的。例如，为改变 ρ 、 μ 必须选择多种流体物料；为适应不同的 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。

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、水等物系)，在实验室规模的小型设备中，经过有限次数的实验并加以理性的推断可以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。

前述中流体湍流流动过程可用图 1-1 所示的“黑箱模型”表示：

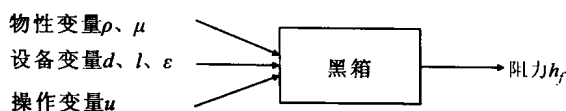


图 1-1 湍流流动阻力的“黑箱模型”

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 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 $[u] = [L]/[T] = [L^1 T^{-1} M^0]$

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

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

$$Re = du\rho/\mu \quad (1-3)$$

$$[Re] = \frac{[d][u][\rho]}{[\mu]} = \frac{[L][LT^{-1}][ML^{-3}]}{ML^{-1}T^{-1}} = [M^0 L^0 T^0] \quad (1-4)$$

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。

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 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ，则它们之间的关系原则上可

用以下函数式表示：

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1-5)$$

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：

$$f_1(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) = 0 \quad (1-6)$$

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因次的数目相等。
- ② 每一个基本因次必须至少在此 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无因次准数。

(3) 相似定理

- ① 相似的物理现象具有数值相等的相似准数(即无因次准数)。
- ② 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。
- 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

$$Eu = C Re^a \left(\frac{l}{d}\right)^b \quad (1-7)$$

式中， $Eu = \frac{\Delta P}{\rho u^2}$ ，称为欧拉数； $Re = \frac{d u \rho}{\mu}$ ，称为雷诺数； $\left(\frac{l}{d}\right)$ ，称为几何相似数。

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

$$\left(\frac{d u \rho}{\mu}\right)_A = \left(\frac{d u \rho}{\mu}\right)_B \quad (1-8)$$

$$\left(\frac{l}{d}\right)_A = \left(\frac{l}{d}\right)_B \quad (1-9)$$

$$\left(\frac{\Delta P}{\rho u^2}\right)_A = \left(\frac{\Delta P}{\rho u^2}\right)_B \quad (1-10)$$

反之，对于流动现象 A 和 B ，可分别以准数函数式表示：

$$Eu_A = f_A \left[Re_A, \left(\frac{l}{d}\right)_A \right] \quad (1-11)$$

$$Eu_B = f_B \left[Re_B, \left(\frac{l}{d}\right)_B \right] \quad (1-12)$$

若 $Re_A = Re_B$ 和 $\left(\frac{l}{d}\right)_A = \left(\frac{l}{d}\right)_B$ ，依相似第二定律，则 A 和 B 必为相似现象，且有 $f_A = f_B$ 。

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 因次分析方法

利用因次分析理论建立变量的无因次准数函数关系的一般步骤如下所述:

(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:

$$F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1-13)$$

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

(3) 根据基本因次写出所有各基本物理量和导出物理量的因次。

(4) 在 n 个变量中选定 m 个基本变量。

(5) 根据 π 定理, 列写出 $n-m$ 个无因次准数

$$\pi_i = x_A^a x_B^b x_C^c \quad (i = 1, 2, \dots, n-m, i \neq A \neq B \neq C) \quad (1-14)$$

式中, x_A 、 x_B 、 x_C 为选定的 $m(=3)$ 个基本变量, x_i 为除去 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 为待定指数。

(6) 将各变量的因次代入无因次准数表达式, 依照因次一致性原则, 可以列出各无因次准数的关于各基本因次的指数的线性方程组, 求解这 $n-m$ 个线性方程组, 可求得各无因次准数中的待定系数 a 、 b 、 c , 从而得到各无因次数群的具体表达式。

(7) 将原来几个变量间的关系式 $f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ 改写成 $(n-m)$ 个无因次准数之间的函数关系表达式

$$F_2(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) = 0 \quad (1-15)$$

以函数 F_2 中的无因次准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, 利用因次分析方法可将几个变量之间的关系转变为 $(n-m)$ 个新的复合变量(即无因次准数)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, 使实验工作量大为减少, 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, 把通过因次分析理论指导组织实施实验的研究方法称为因次论指导下的实验研究方法。

应用因次分析方法, 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化, 其实验难度之大是难以想象的。但由于 ρ 、 μ 、 d 和 u 共组于无因次数群 Re 中, 所以无需设法改变 ρ 和 μ , 只需简单地调节 u 使 Re 改变即可, 这是其他实验方法所不具备的强特点。

应该指出的是, 虽然因次论指导下的实验方法有上述诸多优点, 但由于因次分析方法在处理工程问题时不涉及过程的机理, 对影响过程的变量亦无轻重之分, 因此, 实验研究结果只能给出实验数据的关联式, 而无法对各种变量尤其是重要变量对过程的影响规律进行分析判断。当过程比较复杂时, 无法对过程的控制步骤或某些控制因素给出定量甚至是定性的描述。从根本上说, 这种实验方法还是一种“黑箱”方法, 其实验结果的应用仅限于实验范围, 若将实验范围外延, 其误差是难以预测的。此外, 在分析过程的影响变量时, 有可能漏掉重要的变量而使结果不能反映工程实际情况, 也有可能把关系不大的变量考虑进来而使得问题复杂化。